

Dissertationsschrift

Ultraschallsignalverarbeitung bei Korrelations- und Vortexverfahren zur Durchflussmessung

Essen, Dezember 2002

Ultraschallsignalverarbeitung bei Korrelations- und Vortexverfahren zur Durchflussmessung

Vom Fachbereich 12 – Maschinenwesen
der Universität Duisburg – Essen
genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor – Ingenieur

Vorgelegt von Dipl.-Ing. Christian Filips
aus Kleinbetschkerek

Datum der mündlichen Prüfung: 10. April 2003

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. K. Görner
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. V. Hans
	Prof. Dr. rer. nat. W. Merzkirch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Durchflussmessung	4
2.1	Das kreuzkorrelative Messverfahren	6
2.2	Das Vortexverfahren	7
2.3	Die Beschreibung der Messstrecke	8
3	Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung	10
3.1	Modulation von Ultraschallsignalen in Strömungen	10
3.1.1	Die Physik des Schalls	10
3.1.2	Modulation der Ultraschallsignale	11
3.2	Auswertung der demodulierten Signale	18
3.3	Phasenrekonstruktion	18
4	Signalrekonstruktion	20
4.1	Theoretische Modellbeschreibung	20
4.2	Modellierung der Ultraschallschranke	22
4.3	Kalmanfilter	24
4.4	Komplexe Bandpassabtastung	29
4.5	Ergebnisse der Phasenrekonstruktion	31
4.5.1	Die ungestörte Strömung	31
4.5.2	Die gestörte Strömung	32
4.6	Simulation des Signalverlaufs	36
5	Die kreuzkorrelative Durchflussmessung	42
5.1	Das kreuzkorrelative Messverfahren	42
5.1.1	Auswertung der demodulierten Ultraschallsignale	42
5.1.1.1	Die ungestörte Strömung	42
5.1.1.2	Die gestörte Strömung	44
5.2	Dreidimensionale Darstellung des Geschwindigkeitsprofils	49
5.2.1	Das Prinzip der Tomographie	49
5.2.2	Aufbau der Messkammer	50
5.3	Rekonstruktionsalgorithmen	51
5.3.1	Die Algebraische Rekonstruktionstechnik (ART)	51
5.3.2	Das Kollokationsverfahren	53
5.3.3	Ein einfaches Interpolationsverfahren zur schnellen tomographischen Darstellung	57

Inhaltsverzeichnis

5.4	Rekonstruktionen mit verschiedenen Algorithmen	58
5.4.1	Darstellung der Ergebnisse	58
5.4.2	Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse	62
5.5	Anpassung der Polynome	64
5.6	Weitere Störungsformen	65
5.7	Schlussfolgerung	65
6	Die Vortex-Durchflussmessung	67
6.1	Theoretische Aspekte und Simualtion	67
6.2	Gemessene Ultraschallsignale	70
6.2.1	Die demodulierte Amplitude	70
6.2.2	Die demodulierte Phase	72
6.2.3	Die Modulationsintensität	74
6.3	Analoge Demodulationsverfahren	76
6.3.1	Verfahren zur Demodulation amplitudenmodulierter Trägersignale	76
6.3.2	Verfahren zur Demodulation phasenmodulierter Trägersignale	79
6.3.3	Vergleich der analogen und digitalen Demodulationsverfahren	83
6.4	Unterschiedliche Trägerfrequenzen	84
6.4.1	Die demodulierte Amplitude	85
6.4.2	Die demodulierte Phase	87
6.5	Unterschiedliche Störkörpergeometrien	89
6.5.1	Der Delta-Störkörper	90
6.5.1.1	Der flach angeströmte Störkörper	90
6.5.1.2	Der spitz angeströmte Störkörper	92
6.5.2	Die Gewindestange	92
6.5.3	Das T-Profil	93
6.5.3.1	Das flach angeströmte T-Profil	94
6.5.3.2	Das spitz angeströmte T-Profil	94
6.6	Ursachen für unterschiedliche Empfindlichkeiten	95
6.7	Vergleich der Störkörpergeometrien	97
6.8	Kalibrierung von Vortexmetern	100

Inhaltsverzeichnis

6.9	Störeinflüsse	102
6.9.1	Umlenkung der Strömung	103
6.9.2	Pulsation	105
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
8	Literaturverzeichnis	112

Nomenklatur

Variablen:

Variable	Einheit	Bedeutung
a_{ij}	1	Gewichtungsfaktoren
A	1	Zustandsmatrix
A	1	Flächenverhältnis
B	1	Eingangsmatrix
B	m	Breite des Störkörpers
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_p, c_v	J/kg K	Spezifische Wärmekapazität
C	1	Beobachtungsmatrix
d	m	Schrankenabstand, Rohrdurchmesser
f_A	Hz	Abtastfrequenz
f_{AM}	Hz	Amplitudenmodulierte Trägerfrequenz
f_{PM}	Hz	Phasenmodulierte Trägerfrequenz
f_T	Hz	Trägerfrequenz
f_w	Hz	Wirbelfrequenz
$\tilde{f}(x)$	m/s	Rekonstruktion
$F_\gamma(\sigma)$	1	Regularisierungsfunktion
g	m/s	Projektionsvektor
G	1	Gewichtungsmatrix
H	m	Höhe des Störkörpers
I	1	Einheitsmatrix
k	m ⁻¹	Wellenzahl
K	1	Kalman-Verstärkung
m	1	Modulationsintensität
n	1	Anzahl der Bildelemente
p	Pa	Druck
p_U	Pa	Umgebungsdruck
P	1	Kovarianzmatrix
Q	1	Prozessrauschmatrix

Nomenklatur

r_w	1	Wirbelfrequenzverhältnis
R	J/kg K	Allgemeine Gaskonstante
R	1	Messrauschmatrix
S	m	Seitenlänge des Störkörpers
Sr	1	Strouhal-Zahl
t	s	Zeit
t_U	°C	Umgebungstemperatur
T	s	Periodendauer
T	K	Temperatur
u_m	m/s	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
\hat{u}	V	Amplitude des Trägersignals
$u(n)$	V	Eingangsvektor
$v(n)$	V	Messrauschenvektor
w_i	m/s	Geschwindigkeit
$w(n)$	V	Prozessrauschenvektor
x	m	Koordinate
x_i	V	Signal i
x_i	m	Stützstellen
x_j	m/s	Wert des jeweiligen Bildelementes
$x(n)$	V	Zustandsvektor
y_i	m	Stützstellen
$y(n)$	V	Beobachtungsvektor

Griechische Variablen:

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	m ⁻¹	Dämpfungskoeffizient
φ	°	Phasenwinkel
φ_0	°	Nullphasenlage
φ_K	1	Linnearkombination vorgegebener Funktionen
$\Delta\varphi$	°	Phasenhub

Nomenklatur

ϕ	V^2	Korrelationsfunktion
γ	1	Regularisierungsfaktor
η	Pa s	Dynamische Viskosität
κ	1	Isentropenexponent
λ	1	Relaxationsparameter
λ	W/m K	Wärmeleitfähigkeit
λ	m	Wellenlänge
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	1	Singulärwert
τ	s	Zeitverschiebung bei der Korrelationsfunktion
ω	Hz	Kreisfrequenz der Schallwelle
ξ_K	1	Koeffizient

1 Einleitung

In den letzten Jahren haben Ultraschall-Durchflussmessgeräte ein großes Interesse geweckt. Die Gründe für die steigende Nachfrage werden durch folgende Vorteile beschrieben, wie z.B. einer kompakten Bauform und einem einfachen mechanischen Aufbau des Messgerätes. Mit dem Verzicht auf bewegte Teile steigt die Lebenserwartung an und die Applikation kann kostengünstiger produziert werden. Kurze Mess- und Ansprechzeiten sind ebenfalls von Interesse, wie eine vernachlässigbare Beeinflussung der Strömung, wodurch auch Druckverluste, die bei anderen Messverfahren auftreten, vermieden oder erheblich reduziert werden können.

Die vorliegende Arbeit stellt die Nachfolge zu den bisher veröffentlichten Beiträgen von *Skwarek* [36], *Windorfer* [37] und *Niemann* [26] dar und präsentiert neue Erkenntnisse sowohl auf dem Gebiet der Korrelations- als auch der Vortexmessung. Probleme in der Ultraschall-Durchflussmessung treten im Bereich der Signaldemodulation verstärkt bei gestörter Strömung auf. Zur bisher angewandten Signalverarbeitung wurde ein neues Verfahren entwickelt, das in Abhängigkeit von der Modulationsintensität bessere Ergebnisse erzielt. Ansätze in Richtung der Mehrpfadmessung wurden in der Form ausgeweitet, dass durch eine gezielte Anordnung der Messpfade die Möglichkeit zur visuellen Darstellung des Strömungsprofils besteht. Im Bereich der Vortexmessung lässt sowohl die Variation der Störkörpergrößen als auch deren Geometrie neue Erkenntnisse über den Zusammenhang von Strömung und Wirbelbildung zu. Auch die Untersuchung unterschiedlicher Ultraschall-Trägerfrequenzen und deren Beeinflussung durch die unterschiedlichen Störkörpergeometrien sind Bestandteil dieser Arbeit.

Eine kurze Einführung für unterschiedliche Ultraschall-Durchflussmessverfahren liefert das Kapitel 2. Eine ausführliche Erläuterung erfolgt für das Messprinzip der Korrelationstechnik und des Vortexverfahrens.

Die Wechselwirkung der in der Strömung befindlichen natürlichen Strukturen mit den Ultraschallsignalen ist komplexer Art und schwierig zu interpretieren. Die dadurch im Ultraschallsignal resultierende Modulation sowohl in der Amplitude als auch in der

1 Einleitung

Phase basiert auf Druck-, Dichte-, Temperatur- sowie Geschwindigkeitsschwankungen. Die Beeinflussung der Modulation durch Druck- und Temperaturänderung wird in einer speziell konzipierten Messkammer untersucht, und die Ergebnisse werden mit theoretischen Ansätzen verglichen. Ergänzende Untersuchungen erfolgen durch eine gezielte Generierung von Druckimpulsen und deren Einfluss auf die Modulation der Ultraschallsignale.

In Kapitel 4 wird zum bisher angewandten digitalen Demodulationsverfahren (QAD) ein neues Demodulationsprinzip vorgestellt, das auf der Basis eines Schätzers entwickelt worden ist. Mit Hilfe eines systemtheoretischen Ansatzes rekonstruiert das eingesetzte Kalmanfilter die demodulierte Phase. Ergebnisse werden sowohl für gemessene als auch simulierte Signale dargestellt und mit den rekonstruierten Signalverläufen durch die QAD verglichen.

Die Korrelation wird sowohl für demodulierte Signale mittels QAD als auch mittels Kalmanfilter in Kapitel 5 behandelt und deren Korrelationsergebnisse präsentiert. Die ersten Ansätze, das Strömungsprofil tomographisch mit Hilfe mehrerer Ultraschallpfade darzustellen, lieferte *Skwarek* [36]. Publikationen aus dem Bereich der tomographischen Darstellung sind nur bei der Anwendung des Laufzeit-Differenzenverfahrens bekannt. Die korrelative Geschwindigkeitsbestimmung zwischen zwei Ultraschallschranken stellt eine Alternative dar. Es werden Algorithmen zur tomographischen Rekonstruktion des Geschwindigkeitsprofils in der Rohrströmung vorgestellt und miteinander verglichen. Untersuchungen erfolgen auch für verschiedene Strömungsarten, wie die ungestörte und auch die gestörte Strömung hinter einem Einfach- oder Raumkrümmer.

Einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die Vortexmessung dar. Die Arbeiten von *Windorfer* [37] beschränkten sich auf die Auswertung der Amplitude aufgrund der Problematik der vorherrschenden Phasensprünge. Durch ein neuartiges Verfahren der Phasenrekonstruktion nach *Niemann* [26] ist auch die Auswertung der Phaseninformation möglich. Die Ergebnisse der Phasenauswertung werden in diesem Kapitel zum ersten Mal vorgestellt.

1 Einleitung

Neben der digitalen Demodulation werden im weiteren Verlauf analoge Demodulatoren vorgestellt und miteinander verglichen. Bisher wurde nur eine Trägerfrequenz von $f_T = 220\text{kHz}$ verwendet. Untersuchungen erfolgten für weitere Trägerfrequenzen von $f_T = 80\text{kHz}$ und $f_T = 160\text{kHz}$. Unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen dem Trägersignal und dem eingesetzten Störkörper resultierten daraus. Durch eine systematische Untersuchung verschiedener Störkörpergeometrien konnte ein Vergleich der unterschiedlichen Empfindlichkeiten dargestellt werden. Unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen lässt sich mit Hilfe einer neu definierten Kenngröße die gleiche Kennliniencharakteristik für verschiedene Störkörpergeometrien bestimmen. Mit Hilfe einer Kalbrierkennlinie wird zum ersten Mal eine Fehlerkurve erstellt, wodurch die Messabweichung des Durchflussmessverfahrens angegeben werden kann. Ergebnisse unter Störeinflüssen beschließen dieses Kapitel.

Das letzte Kapitel stellt in kurzer Form die wesentlichen gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammenfassend dar und endet mit einem Ausblick über mögliche Anknüpfungsansätze.

2 Grundlagen der Durchflussmessung

Die Durchflussmessung im industriellen Sektor ist heutzutage ein interessantes und schwieriges Thema zugleich. Die genaue Bestimmung der tatsächlichen Fördermenge ist Voraussetzung für den zuverlässigen Einsatz von Applikationen in vielen Bereichen. Schon geringe Abweichung führen zu erheblichen zusätzlichen Kosten. Ein fehlerfreies Verfahren zur Durchflussbestimmung gibt es nicht. Eine Vielzahl von Messprinzipien wurde in den letzten Jahrzehnten entwickelt und auch weitestgehend optimiert.

Die Qualität der Durchflussbestimmung hängt prinzipiell von dem angewandten Verfahren ab. Die Geschwindigkeitsmessung in einer Rohrströmung kann mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden. Diese Verfahren weisen Möglichkeiten auf, die mehr oder weniger abhängig vom Strömungsprofil sind. Jedes einzelne Verfahren hat seine Vorteile (z.B. eine einfache Handhabung, Robustheit, altbewährte Technik) und seine Nachteile (z.B. Abweichung durch Verschleiß, hoher Kosten- bzw. Betriebsaufwand). Diese Verfahren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen [3]. Die erste Gruppe beschreibt die sog. „klassischen Verfahren“. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die klassischen Durchflussmessverfahren.

Tabelle 2.1: Übersicht über die klassischen Durchflussmessverfahren.

Wirkdruck	Prandtl-Staurohr, Blende, Düse
Volumenzähler	Ringkolben-, Drehkolben-, Ovalrad-, Balgen-, Turbinenradzähler
Differenzdruck bzw. Kraft	Schwebekörper, Kapillare, Vortexzähler

Die zweite Gruppe stellt sich aus den Verfahren der sog. „Neuerungen“ zusammen. Auch diese sind tabellarisch aufgeführt.

2 Grundlagen der Durchflussmessung

Tabelle 2.2: Übersicht über die neuen Durchflussmessverfahren.

Induktive Verfahren	Magnetisch-induktive Durchflussmesser (MID)
Ultraschall	Laufzeitdifferenzen-, Doppler-Verfahren, Korrelation, Wirbelzähler
Massendurchfluss	Coriolis-Durchflussmesser
Thermische Verfahren	Heissfilm-, Hitzdrahtanemometrie (nur im Laborbetrieb)
Weitere Verfahren	LDA, PIV (nur im Laborbetrieb)

Viele Arbeiten wurden in diesem Bereich im Rahmen von Forschungsprojekten durchgeführt. Dabei wurden grundlegende Aspekte geklärt, was im wesentlichen zur Optimierung des jeweiligen Verfahrens geführt hat. Im Folgenden soll der Bereich der Neuerungen, speziell das Ultraschall-Messverfahren näher betrachtet werden. Das Laufzeit- und das Doppler-Verfahren ist in den letzten 20 Jahren intensiv untersucht worden und findet auch verstärkt in industriellen Bereichen Anwendung.

Das korrelative Verfahren ist neben den vorher genannten relativ zuverlässigen Methoden in den 80er Jahren ins Abseits geraten aufgrund der komplexen Signalverarbeitung. Doch in den letzten Jahren hat *Poppen* [30] mit seinem Beitrag gezeigt, dass die Korrelation eine Alternative darstellt. Mit ansteigender Leistungsfähigkeit im Rechnerbereich konnte die computergestützte Signalverarbeitung durch *Skwarek* [36] verbessert werden. Mit einer Optimierung und Verbesserung sind Fortschritte in der Signalverarbeitung zu verzeichnen [26]. Die Arbeiten tragen auch zur Klärung physikalischer Grundlagen zwischen der Interaktion Ultraschall und Strömung bei. Forschungstätigkeiten im Bereich der Korrelation wurden ebenfalls an anderer Stelle durchgeführt, z.B. [38].

Aber auch in der Vortexmessung gab es in den letzten Jahren Neuerungen. Die kommerziellen Applikationen arbeiteten bisher überwiegend auf der Basis der Druckmessung. Die neue Sensorik besitzt Vorteile, die im Rahmen einer Forschungsarbeit [37] vorgestellt und angewandt wurde. Auch in dieser Arbeit wurden wichtige Aspekte untersucht und somit weitere Fragen in der Grundlagenforschung geklärt.

2 Grundlagen der Durchflussmessung

Die Ultraschallmessung auf Basis des kreuzkorrelativen Messverfahrens und der Vortexmessung stellt ein zentrales Thema dieser Arbeit dar. Beide Verfahren und die Funktionsprinzipien werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

2.1 Das kreuzkorrelative Messverfahren

Das Prinzip der Korrelationstechnik basiert auf dem Vergleich ähnlicher Signale. Die in Bild 2.1 dargestellte Prinzipskizze stellt das korrelative Messverfahren dar.

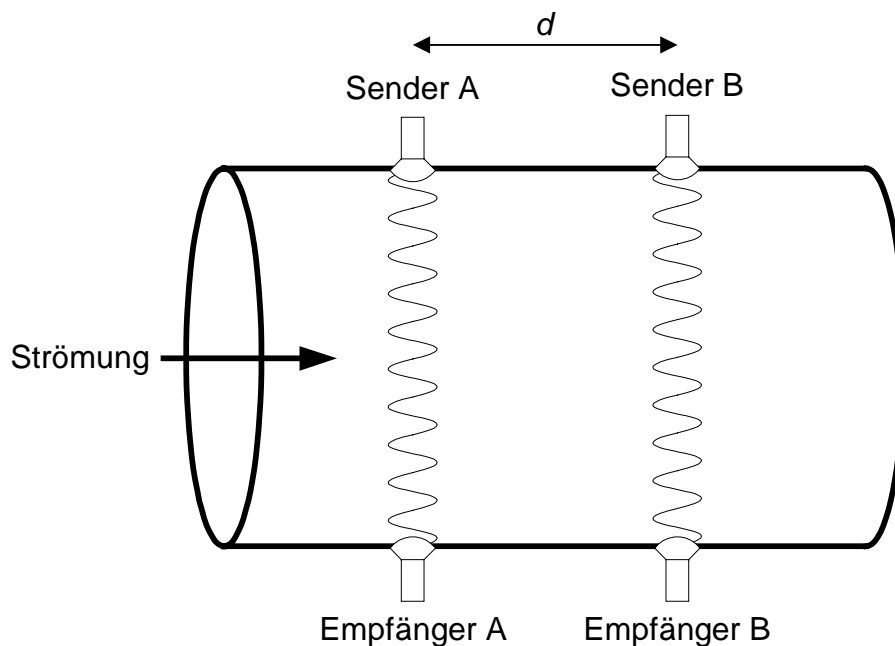


Bild 2.1: Skizze des kreuzkorrelativen Verfahrens.

Zwei Sender-Empfänger-Paare, die auch als Schranken bezeichnet werden, sind hintereinander im Abstand d senkrecht zur Strömungsrichtung in der Rohrwand befestigt. Die Sender werden mit einem Sinussignal mit einer Trägerfrequenz von $f_T = 220\text{kHz}$ und einer verstärkten Amplitude von $\hat{u} = 12\text{V}$ gespeist. Während der Strömungsdurchschallung werden beide Ultraschallschranken durch turbulente Wirbelstrukturen moduliert. Das mathematische Konzept der Korrelation lässt sich durch die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) $\Phi_{AB}(\tau)$ beschreiben.

$$\Phi_{AB}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_A(t) x_B(t - \tau) dt. \quad (2.1)$$

2 Grundlagen der Durchflussmessung

Eine markante turbulenzbedingte Änderung des Empfangssignals an der ersten Schranke ist zeitverzögert im Empfangssignal stromab der zweiten Schranke wiederzufinden. Gesucht wird die maximale Ähnlichkeit beider Signale, die sich im Maximum der KKF widerspiegelt. Diese Zeitverschiebung entspricht der gesuchten Laufzeit zwischen beiden Schranken. Um mit Hilfe der KKF die Geschwindigkeit in der Rohrströmung zu erhalten, bedient man sich der Gleichung

$$u_m = \frac{d}{\tau(\hat{\Phi}_{AB})}. \quad (2.2)$$

2.2 Das Vortexverfahren

Der Effekt der periodischen Wirbelablösung hinter Störkörpern wurde von Kármán Anfang des 20. Jahrhunderts zum ersten Mal mathematisch beschrieben. Daraus resultierte ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Wirbelfrequenz f_w und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m , und der als Strouhal-Zahl Sr bekannten Größe für unterschiedliche Störkörper der Abmessung d

$$Sr = \frac{f_w \cdot d}{u_m}. \quad (2.3)$$

Dieses relativ einfache Prinzip fand in vielen Messapplikationen Anwendung. Die Erfassung der Wirbel erfolgt auf unterschiedlichste Art und Weise. Konventionelle Detektionssysteme wie z.B. mechanische und thermische Sensoren sind eine altbewährte Technik. Die Ultraschallmessung in diesem Bereich ist erst in den letzten Jahren aufgrund der einfacheren Handhabung und der hohen Empfindlichkeit der Sensorik von Interesse.

Die periodische Ablösung der Wirbel moduliert die Ultraschallschranke (Bild 2.2). Als charakteristische Größe der Modulation wird die Wirbelfrequenz erfasst. Die Strömungsgeschwindigkeit wird durch die o.a. Gleichung bestimmt.

2 Grundlagen der Durchflussmessung

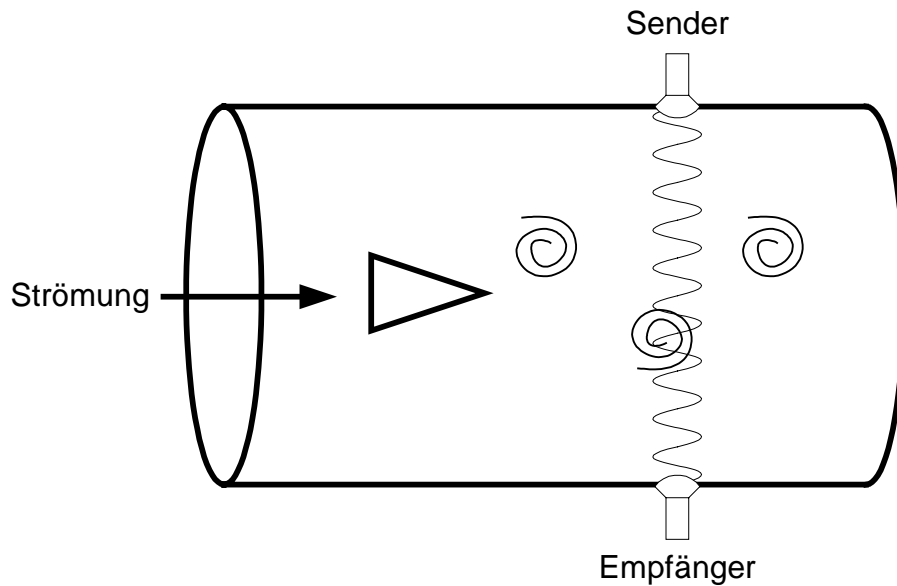


Bild 2.2: Skizze des Vortexverfahrens.

2.3 Beschreibung der Messstrecke

Die schematische Darstellung der Messstrecke ist in Bild 2.3 zu sehen. Der Aufbau gliedert sich in zwei Teile, einen fest aufgebauten Teil I, bestehend aus:

- einem Gebläse, mit dem eine maximale Geschwindigkeit von bis zu $u_{\max} = 35 \text{ m/s}$ erzielt werden kann,
- einem Turbinenradgaszähler, der als Referenz dient und bis zu einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit von $u_{\max} = 25 \text{ m/s}$ geeicht ist,
- sowie einem Gleichrichter, der Störungen in der Strömung vor dem Turbinenradgaszähler abbaut.

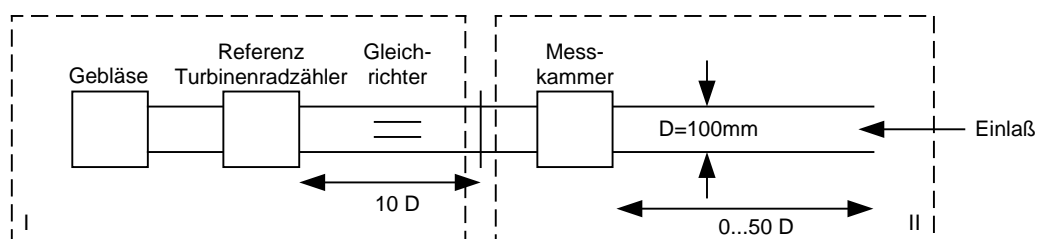


Bild 2.3: Skizze der Messstrecke

2 Grundlagen der Durchflussmessung

Der zweite Teil (II) entspricht einem in der Länge variablen Rohrsystem aus Plexiglas mit einem Durchmesser D von 100mm . Die Messkammer, die zum einen zur Korrelation und zum anderen für die Vortexmessung umgebaut werden kann, wird zwischen $0...50D$ hinter dem Einlaß installiert. Für ein ungestörtes Strömungsprofil in der Messstrecke ist ein Abstand von $50D$ vom Einlaßbereich ausreichend. Zusätzlich ist eine weitere Verbindung mit einem Einfach- bzw. Raumkrümmer oder einer anderen Form der Strömungsbeeinflussung im Einlaßbereich möglich, um die generierte Störung auf das Messgerät untersuchen zu können. Die Möglichkeit den Abstand zur Störquelle variieren zu können, läßt eine Vielzahl von Untersuchungen zu, um den Einfluss der Störung auf das Messgerät in Abhängigkeit von der Entfernung aufzuzeigen.

Die Strömungsgeschwindigkeit in der Strecke wurde geregelt. Die Regelabweichungen der Strömungsgeschwindigkeit betrug $\pm 1\%$. Dadurch waren Wiederholungsmessungen sehr gut reproduzierbar.

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

3.1 *Modulation von Ultraschallsignalen in Strömungen*

3.1.1 Die Physik des Schalls

Eine Vielzahl von Phänomenen, die in der Natur vorkommen, ist weitestgehend physikalisch geklärt. Dazu zählen u.a. auch mehrere Arten von Wellen, wovon nur zwei von besonderer Bedeutung sind: das Licht und der Schall. Sowohl das Licht als auch der Schall lassen sich in verschiedene Bereiche einteilen. Von Interesse bei der Verwendung von Schall sind Frequenzen im „nicht hörbaren“ Bereich, im Bereich des Ultraschalls.

Schallwellen breiten sich niemals verlustfrei aus, sondern erfahren eine Dämpfung durch dissipative Prozesse, d.h. die Schalldruckamplitude nimmt mit wachsendem Abstand von der Quelle ab. Dieser Effekt wurde in der Arbeit von Skwarek [36] durch die Wellengleichung beschrieben:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (3.1)$$

Eine Lösung der Wellengleichung gibt [33] mit Hilfe der partiellen Ableitung der Euler'schen Gleichung nach dem Ort x , sowie der partiellen Ableitung der Kontinuitätsgleichung nach der Zeit t im folgenden Ansatz an:

$$p(x, t) = \hat{p} \cdot e^{[-\alpha x + (\omega t - kx)]}. \quad (3.2)$$

\hat{p} entspricht der maximalen Druckamplitude, der Wert α einem Dämpfungskoeffizienten, ω der Kreisfrequenz der Schallwelle und k der Wellenzahl in Abhängigkeit vom Ort x . Eine sinnvolle partikuläre Lösung dieser Wellengleichung stellt die ebene Sinuswelle

$$p(x, t) = \hat{p} \cos \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) + \varphi_0 \right] \quad (3.3)$$

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

dar, die in der Literatur als allgemeiner Ansatz angegeben wird. Sie beschreibt an einem Ort x die zeitliche cosinusförmige Druckschwankung bzw. zu einer festen Zeit t die in x -Richtung cosinusförmige Schalldruckverteilung $p(x,t)$ unter Berücksichtigung der Nullphasenlage φ_0 .

Die in der Gleichung 3.1 auftretende Größe c entspricht der Schallgeschwindigkeit. Unter der Annahme eines idealen Gases berechnet sich die Schallgeschwindigkeit zu

$$c = \sqrt{\kappa RT} . \quad (3.4)$$

In dieser Gleichung ist die allgemeine Gaskonstante R und das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten $\kappa = c_p / c_v$ gegeben. Der Schalldruck kann an jeder beliebigen Stelle berechnet werden. Mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle nimmt der Schalldruck ab. Durch die Einkopplung des Schalls vom festen in das gasförmige Medium (vom Körper- zum Luftschall) und anschließend umgekehrt treten zusätzlich Verluste auf, die auf die unterschiedlichen Feldkennimpedanzen bezogen auf Gas und Festkörper zurückzuführen sind [20]. Das am Empfänger ankommende Signal wird durch die Dämpfung des Luftschalls und durch die nicht vollständige Impedanzanpassung an den beiden Kopplungsstellen beeinflusst.

3.1.2 Modulation der Ultraschallschranke

Ultraschall breitet sich in einem Medium in Form von Wellen aus. Bei der Durchschallung von Medien beeinflussen unterschiedliche Effekte die Wellenausbreitung. Ruht das Medium, tritt nur der Effekt auf, dass das Sendesignal gedämpft wird. Die Dämpfung bzw. Absorption erfolgt durch die Umwandlung der mechanischen Energie in Wärme. Wird das Medium in Bewegung versetzt, werden die Ultraschallwellen aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt. Natürlich vorkommende Inhomogenitäten, wie z.B. lokale Geschwindigkeits-, Temperatur-, Druck- und Dichteunterschiede führen zur Beugung und Streuung der Ultraschallwellen. Diese Einflüsse werden den Ultraschallwellen aufgeprägt, d.h. die

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

Ultraschallwellen werden moduliert. Die Charakteristik des vorherrschenden Zustandes in einem Medium spiegelt sich in der Modulation wieder.

Inhomogenitäten sind charakteristisch für turbulente Strömungen. Die Modulation erfolgt sowohl in der Amplitude als auch in der Phase der Ultraschallwelle. Die Ursachen, inwieweit die einzelnen Modulationskomponenten beeinflusst werden, sind bereits in [37] mathematisch beschrieben worden. Ergebnisse zur experimentellen Untersuchung über die Ursache, die zur Modulation dieser beiden Komponenten führt, sind im Folgenden aufgeführt.

Die Wechselwirkung zwischen Ultraschall und ruhendem Medium kann in diesem Falle für die Modulation der Amplitude experimentell untersucht werden. Hierzu wurde eine Messkammer konzipiert (Bild 3.1), in der Druck und Temperatur variiert werden können.

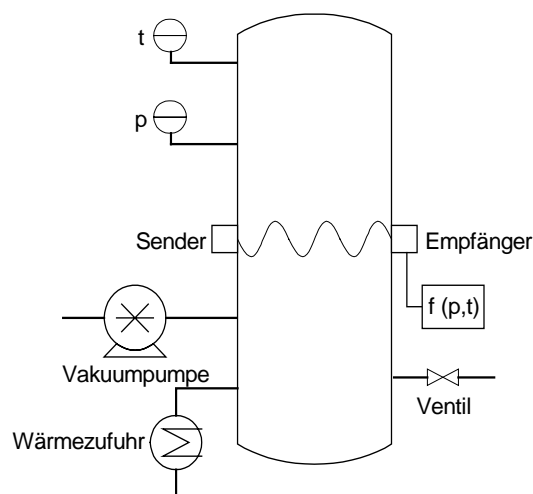


Bild 3.1: Schematischer Aufbau der Messkammer zur Messung der Amplitudenmodulation.

Der Versuchsstand besteht aus einem 300mm langen Rohrstück von 100mm Durchmesser, das an beiden Enden mit Einsätzen luftdicht verschlossen ist. Eine Ultraschallschranke wird mit einem 220kHz Trägersignal gespeist. Die Amplitude des Empfangssignals wird auf 1 Volt verstärkt und dient für die weiteren Untersuchungen als Referenz bezogen auf die Anfangsbedingungen bei gegebenem Umgebungsdruck p_U bzw. -temperatur t_U .

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

Der absolute Druck weist keinerlei Ähnlichkeiten in Bezug auf die Modulation der Amplitude auf. Amplitudenschwankungen wurden nur während der Untersuchung zwischen diskreten Werten festgestellt. Es ist offensichtlich, dass eine Modulation durch dynamische Druckänderungen hervorgerufen wird. Diese Komplexität ist ebenfalls im strömenden Medium zu finden, da natürliche Strukturen in Form von Druck-, Dichte-, Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldern gekennzeichnet sind.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss der Temperatur im Bereich von $20-80^{\circ}\text{C}$ in 5K -Schritten bei Umgebungsdruck untersucht. Die Aufnahme der Temperatur erfolgte mit einem PT100. Die Auswirkung des Temperaturunterschiedes ist in dem folgenden Diagramm dargestellt.

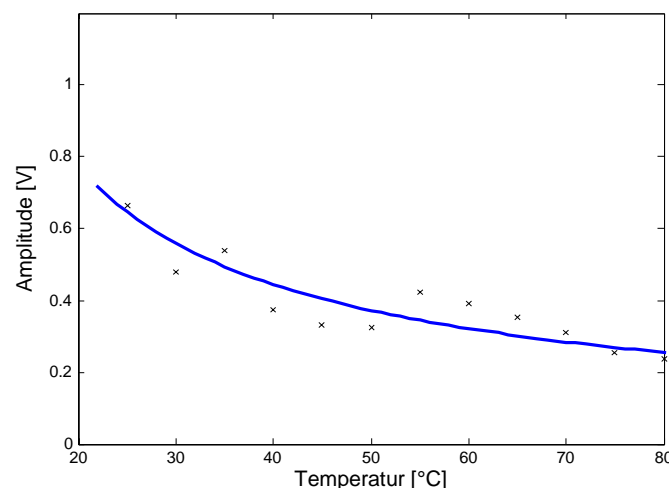


Bild 3.2: *Amplitudenmodulation bei Temperaturschwankungen.*

Diese Untersuchung dient zur Klärung physikalischer Einflüsse auf die Ultraschallschranke. Die gewählte Temperaturspanne wird nur bei Anfahr- bzw. Abkühlungsvorgängen erreicht. Bei dieser Untersuchung wurden vier Messreihen aufgenommen. Alle vier Verläufe zeigten einen konformen Verlauf an, der in Bild 3.2 gemittelt für den Verlauf der Amplitude bei variierender Temperatur dargestellt ist. Da die Aufnahme des Maximums der Amplitude zu diskreten Temperaturen erfolgte, in der Darstellung mit x gekennzeichnet, wurde zur besseren Illustration ein Ausgleichspolynom durch die diskreten Werte gelegt. Die erste Aussage, die in diesem Zusammenhang getroffen werden kann, ist, dass eine Reproduzierbarkeit bei gleichen Randbedingungen gegeben ist. Durch das dargestellte Verhalten der

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

Amplitude bei variierender Temperatur stellt sich im betrachteten Bereich ein potentieller Abfall ein. Mit Hilfe der Simulation wird überprüft, inwieweit die gewonnenen Erkenntnisse unter reellen Bedingungen physikalisch beschrieben werden können. Das sich in Ruhe befindliche Medium kann als homogen angesehen werden, so dass nur eine Absorption der Schallwelle erfolgen kann. Die Schallabsorption kann durch einen exponentiellen Verlauf beschrieben werden

$$p(x) = \hat{p} \cdot e^{(-\alpha x)}. \quad (3.5)$$

Der Abstand zwischen Sender und Empfänger ist konstant, so dass die Amplitude an der Stelle $x = 0,1m$ bestimmt wird. Die Reduzierung der Schallamplitude im ruhenden Medium entspricht ca. 1–2%, die für den Bereich 20–80°C numerisch ermittelt wurde. Die Berechnung des Absorptionskoeffizienten α , der zum einen den Einfluss der Verformung durch die Schallwelle berücksichtigt und zum anderen die Auswirkung des Wärmeaustausches zwischen benachbarten Volumenelementen beschreibt, erfolgt durch:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \eta \cdot \omega^2}{3 \cdot \rho \cdot c^3} + \frac{(\kappa - 1) \cdot \lambda \cdot \omega^2}{\kappa \cdot \rho \cdot c_v \cdot c^3}, \quad (3.6)$$

mit der Kreisfrequenz ω und den temperaturabhängigen Stoffwerten für Luft, wie Dichte ρ , Wärmeleitfähigkeit λ , Viskosität η , spezifische Wärmekapazität c_v und Schallgeschwindigkeit c . Der Wert des Absorptionskoeffizienten liegt zwischen $\alpha = 0,889 - 0,933m^{-1}$ für den o.a. Temperaturbereich.

Die Dämpfung der Amplitude durch das ruhende Medium kann aufgrund des numerischen ermittelten Ergebnisses vernachlässigt werden. Die Erklärung für den tatsächlichen Verlauf der Schallabnahme liegt in der Einkopplung fest-gasförmig bzw. gasförmig-fest begründet. Eine numerische Berechnung ist aufgrund unzureichender Informationen über das Material und dessen Verhalten bei variierendem Temperatureinfluss nicht möglich. Skwarek hat in seiner Arbeit das Übertragungsverhalten dieses Systems fest-gasförmig-fest untersucht und kam zu

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

dem Ergebnis, dass an den Einkopplungsstellen die größten Verluste vorherrschen. Diese Untersuchung bekräftigt zusätzlich die o.a. Aussage.

Eine Beeinflussung der Phase konnte aus den experimentellen Untersuchungen in diesem Falle nicht festgestellt werden. Dieses lässt sich nur rein mathematisch durch die in Gleichung 3.3 angegebene Wellengleichung ermitteln. Hierzu wird die Nullphasenlage gleich Null gesetzt und die Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Temperatur für den Bereich $20 - 80^{\circ}\text{C}$ dargestellt. Dabei stellt die Phasenlage bei Umgebungstemperatur $t_U = 20^{\circ}\text{C}$ die Referenz dar.

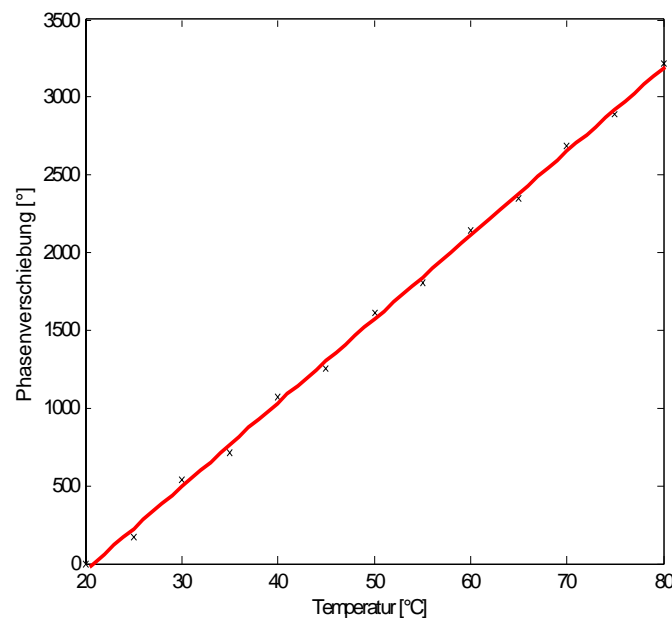


Bild 3.3: Numerische Bestimmung des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Temperatur.

Wie aus Gleichung 3.3 erkennbar, bewirkt die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit eine Phasenverschiebung im ruhenden Medium mit zunehmender Temperatur bei einem konstanten Nullphasenwinkel. Die diskreten Werte schwanken im Bereich von ca. $150^{\circ} - 200^{\circ}$ aufgrund der in die Berechnung einfließenden nichtlinearen Ermittlung der Schallgeschwindigkeit (Gleichung 3.4). Dieser Einfluss wird in Bild 3.3 durch die Ausgleichsgerade verdeutlicht.

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

Weitere Untersuchungen bezüglich der Modulation von Ultraschallsignalen wurden mittels eines von [21] entwickelten Druckluftimpulsgenerators durchgeführt. Die Modulationscharakteristik ist abhängig von der Höhe der Amplitude der eingebrachten Druckluftstöße. Hierbei wurden die Druckimpulse im Bereich von $0.8\text{--}1.7\text{bar}$ variiert. Der Einfluss der unterschiedlichen Druckimpulse ist im Folgenden für die demodulierte Amplitude bzw. Phase des Ultraschallsignals dargestellt.

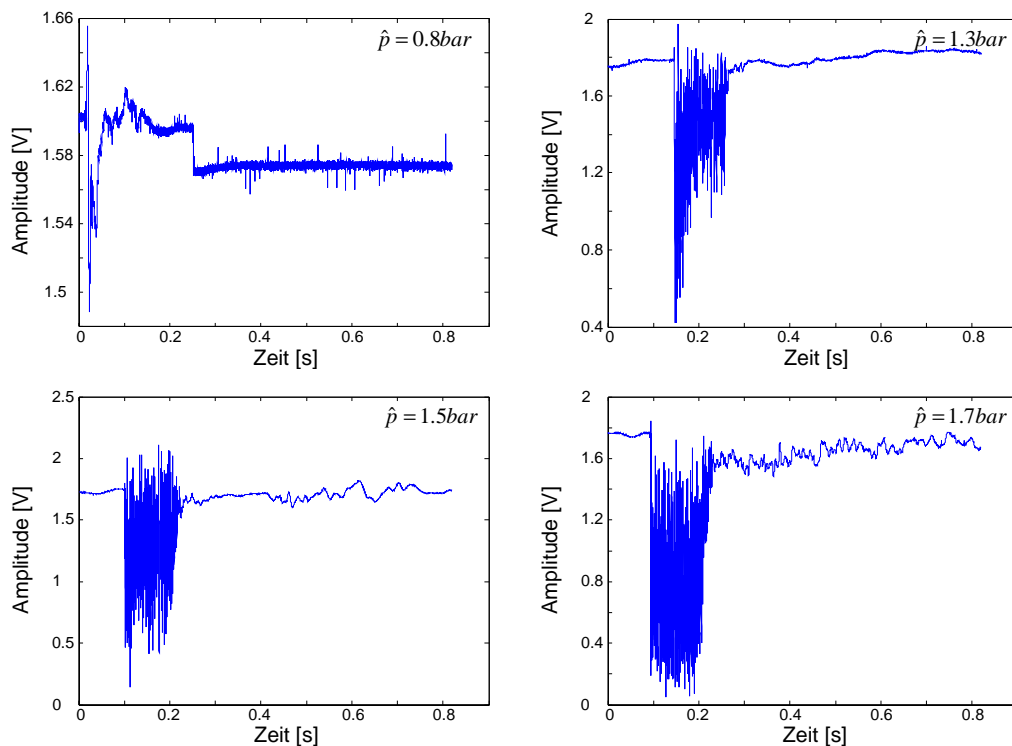


Bild 3.4: Charakteristische Amplitudenmodulation bei unterschiedlichen Druckimpulsen.

Mit ansteigender Amplitude des Druckstoßes nimmt proportional der Modulations-einfluss zu. Die Modulation bei einer Amplitude von $\hat{p} = 0.8\text{bar}$ ist relativ gering im Vergleich zu den höheren Druckimpulsen. Dies resultiert daraus, dass der Druck während der Einstromzeit, in den einzelnen Signalen gut zu erkennen, abfiel. Die Modulation des Amplitudensignals nach dem Schliessen des Ventils ist auf die nachströmende Luft hinter dem Druckstoß zurückzuführen. Die erste auftretende Wellenfront des Druckimpulses erhöht minimal das Amplitudensignal, fällt danach in Abhängigkeit vom Druckimpuls ab. Die Modulation durch den Druckstoß erfolgt durch

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

eine Abnahme der Amplitude des Ultraschallsignals. Weitere Erkenntnisse werden aus der Betrachtung der Modulation des Phasensignals gewonnen (Bild 3.5).

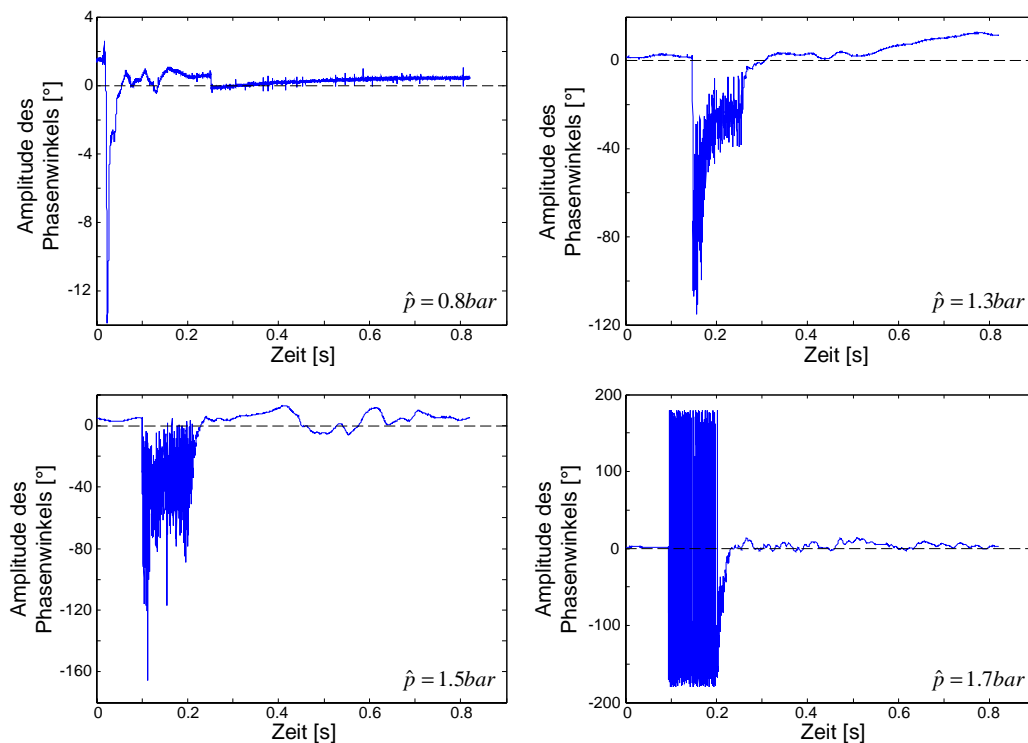


Bild 3.5: Charakteristische Phasenmodulation bei unterschiedlichen Druckimpulsen.

Die Charakteristik des Phasenverlaufs knüpft an den zuvor betrachteten Amplitudenverlauf an. Auch hier ist die Tendenz der Abnahme der Phase durch die Beeinflussung des Druckstoßes zu erkennen. Die Darstellung bei einer Druckamplitude von $\hat{p} = 1.3bar$ zeigt eindeutig den Druckabfall während der Einstromzeit. Die Intensität des Phasenhubs ist proportional zum vorherrschenden Druckpegel. Bei einer Druckamplitude von $\hat{p} = 1.7bar$ werden die Grenzen der Phasenrekonstruktion eindeutig überschritten, wodurch Phasensprünge auftreten, die für eine weitere Signalverarbeitung zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Somit ist die Auswertung der Phaseninformation nur in einem beschränkten Bereich möglich. Ohne Beschränkungen erfolgt die Auswertung der Amplitudeninformation über einen größeren Bereich. Inwiefern sich die jeweiligen Komponenten im praktischen Einsatz unterscheiden und welche Auswertung vorteilhafter ist, wird in den kommenden Kapiteln gezeigt.

3.2 Auswertung der demodulierten Signale

Die dem Trägersignal aufgeprägten Informationen befinden sich in dessen Seitenbändern. Die maximale Bandbreite der Modulation beträgt ca. $2-3\text{kHz}$. Das Trägersignal hat eine Frequenz von 220kHz . Das in [30] eingeführte und angewandte Unterabtastverfahren fand in den weiterführenden Arbeiten [36], [37] und [26] Anwendung. Durch einen ganzzahligen Teiler der Trägerfrequenz erweist sich die Unterabtastung von Vorteil. Das Spektrum wird in das Basisband verschoben. Dadurch wird die Trägerfrequenz eliminiert und zur weiteren Verarbeitung steht das modulierte Signal zur Verfügung.

Mit Hilfe von geeigneten Demodulationsverfahren wird die Information aus dem modulierten Signal gefiltert, woraus die Modulationskomponenten Amplitude und Phase bestimmt werden. Dies erfolgt mit der komplexen Bandpassabtastung, die zum einen mittels einer elektronischen Hilbert-Transformation bzw. einer komplexen Mischung (Quadraturdemodulation) realisiert werden kann. Das Prinzip beider Verfahren wird in [37,26] erläutert. Die komplexe Bandpassabtastung und die QAD werden in Kapitel 4 ausführlicher beschrieben.

3.3 Phasenrekonstruktion

Schon in der Arbeit von Skwarek wurde die Phase aufgrund des höheren Informationsinhaltes ausgewertet. Bisher erfolgte die Rekonstruktion des demodulierten Phasenverlaufs sowohl für die Korrelations- als auch für die Wirbelfrequenzmessung nach dem gleichem Schema [36,37]. Der Rekonstruktionsalgorithmus der Phase führte zu Problemen, sobald Phasensprünge um das 2π -Inkrement auftraten, die verstärkt in gestörten Strömungen zum unerwünschten Effekt der fortlaufenden Phase im Zeitsignal führten. Die eingebauten Störkörper in der Vortexmessung erzielen höhere Modulationsintensitäten, so dass die Auswertung der Phase zu Fehlinterpretationen führte und sich [37] auf die Auswertung der Amplitude beschränkte.

Eine neuartige Rekonstruktionstechnik zur Unterdrückung unnatürlicher Phasensprünge hat [26] entwickelt, die auf statistischen Auswertungen beruht. In einem Histogramm wird die Phasenhäufigkeit über den Winkelpositionen erstellt. Das

3 Grundlagen der Ultraschall-Durchflussmessung

Maximum der Verteilung entspricht dem Phasenoffset bzw. der Nullphasenlage und wird in die Winkelposition 0° verschoben, so dass bei einer möglichen Normalverteilung eine Symmetrie um den Nullwinkel vorliegt. Je größer die Modulationsintensität der Phase, umso breiter und flacher wird die entsprechende Häufigkeitsverteilung dargestellt. Weitere Untersuchungen zur Phasenrekonstruktion insbesondere für die Vortexmessung werden in Kapitel 6 ausführlicher beschrieben.

4 Signalrekonstruktion

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beschreibung dynamischer Systeme. Für die Modellbildung dynamischer Systeme eignen sich Darstellungen im Zustandsraum. Ein System ist im einfachsten Beispiel mit einem Eingangs- und einem Ausgangssignal versehen (single input single output). Da es sich bei komplexen Vorgängen nicht immer um SISO-Systeme handelt, sondern häufig mehrere Ein- und Ausgänge vorliegen, werden diese als MIMO-Systeme (multiple input multiple output) bezeichnet [14]. Die Geschwindigkeitsbestimmung von Fluiden mittels Ultraschall kann als ein komplexes System angesehen werden, woraus Informationen aus der Signaldemodulation der Phase und der Amplitude resultieren, die einem MIMO-System entsprechen.

In den folgenden Abschnitten werden Modelle zur Beschreibung des Systems aufgeführt. Diese Modellbildung im Zustandsraum dient als Grundlage einer fortführenden Überlegung, den Phasenverlauf des Ultraschallsignals mittels eines Filters (Kalmanfilter) zu rekonstruieren. Im weiteren Verlauf wird dieser aus den Beobachtungen geschätzte Verlauf mit dem bisher rekonstruierten Phasenverlauf mittels QAD verglichen. Ein Schätzalgorithmus kann sowohl für ablaufende Vorgänge in der Gegenwart als auch zur Vorhersage zukünftiger Ereignisse eingesetzt werden. Die Anregung dafür stammt aus der Nachrichtentechnik und die in den letzten Jahren erzielte Verbesserung der Demodulation von Sprachsignalen aus dem Telekommunikationsbereich [1]. Die Übertragung eines bewährten Demodulationsverfahrens auf die vorliegende Aufgabe in der Ultraschall-Durchflussmessung beweist weiteres Potential für neue Signalverarbeitungstechniken, die eine ausführliche Untersuchung in diesem Bereich erfordern.

4.1 *Theoretische Modellbeschreibung*

Komplexe Systeme können im allgemeinen nur beschränkt und somit nicht vollständig mathematisch beschrieben werden. Es liegen zum Teil Differentialgleichungen höherer Ordnung vor, die Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Lösung bereiten. Um dieser Problematik entgegenzukommen, werden Differentialgleichungen m -ter Ordnung in ein System von m Differentialgleichungen

4 Signalrekonstruktion

1.Ordnung überführt [14]. Die allgemeine Modellierung eines betrachteten dynamischen Systems setzt sich aus zwei Teilsystemen zusammen. Das erste Teilsystem stellt das sogenannte Beobachtungsmodell dar (Bild 4.1). Die formalen Größen in dieser Abbildung und auch alle folgenden mathematischen Herleitungen werden für den zeitdiskreten Fall angegeben.

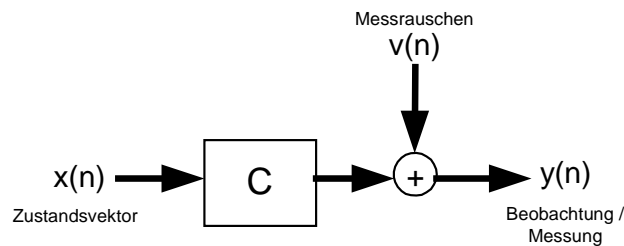


Bild 4.1: Beobachtungsmodell.

Das Modell setzt sich aus einem unbekannten Zustandsvektor $x(n)$ als Eingangsgröße, einer Beobachtungsmatrix C , einem Messrauschvektor $v(n)$ und einem Beobachtungvektor $y(n)$ als Ausgangsgröße zusammen. Das Rauschen wird als weißes, gaußverteiltes Rauschen angenommen. Das Beobachtungsmodell wird in zeitdiskreter Form durch folgenden Ansatz angegeben

$$y(n) = C \cdot x(n) + v(n). \quad (4.1)$$

Das zweite Teilsystem stellt das sogenannte Zustandsraummodell dar. Eine allgemeine Zustandsraumdarstellung liefert Bild 4.2.

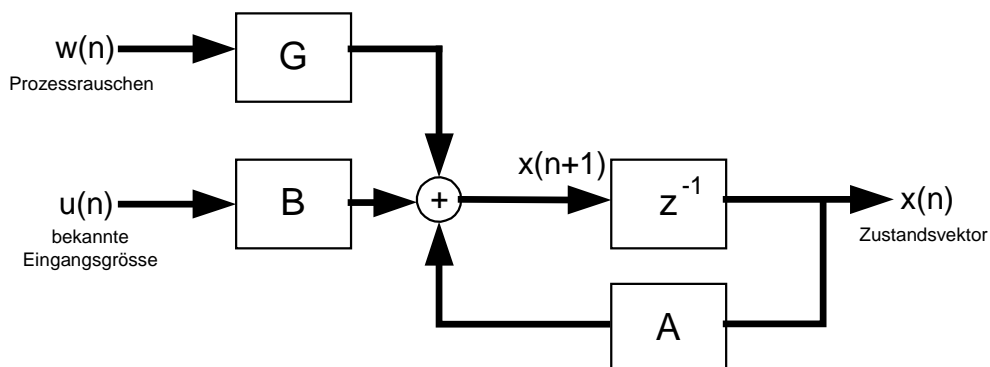


Bild 4.2: Zustandsraummodell.

4 Signalrekonstruktion

Als Eingangsgrößen des Modells stehen der Eingangsvektor $u(n)$ mit bekannter Eingangsmatrix B und der Prozessrauschvektor $w(n)$ mit der Gewichtungsmatrix G zur Verfügung. A stellt die Zustandsmatrix dar, die durch die Rückführung den Zustandsvektor beeinflusst. Diese gewichtete Größe wird zu den beiden Eingangsgrößen hinzuaddiert und stellt den folgenden Wert des Zustandsvektors $x(n+1)$ als zukünftiges Ereignis dar. Der Ausdruck z^{-1} stellt die Beziehung zwischen dem momentanen Zustand $x(n)$ und dem folgenden Zustand $x(n+1)$ her. Formal lässt sich das Modell angeben zu

$$x(n+1) = A \cdot x(n) + B \cdot u(n) + G \cdot w(n). \quad (4.2)$$

Beide Teilsysteme werden in folgender Abbildung zusammengefasst.

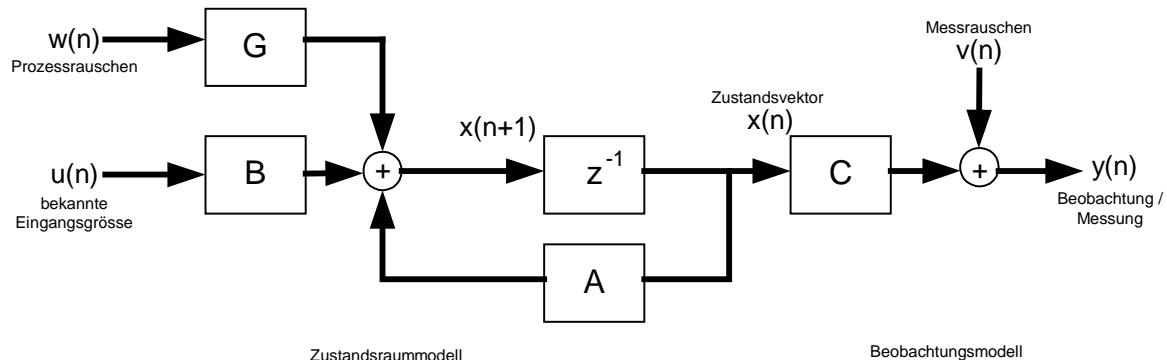


Bild 4.3: Systemmodell.

Die hier aufgeführten mathematischen Herleitungen beschränken sich auf lineare dynamische Prozesse. Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, dass das hier zu modellierende System ein nichtlineares Verhalten aufweist, und wie diese Aufgabenstellung gelöst werden kann.

4.2 Modellierung der Ultraschallschranke

Wie zu Beginn des Kapitels bereits erwähnt, stellt die o.a. Modellierung die Grundlage dar, ein neues Demodulationsverfahren zu konzipieren. Der Rekonstruktionsalgorithmus entspricht einem Kalmanfilter zur Demodulation phasenmodulierter Signale.

4 Signalrekonstruktion

Die modulierten Signale liegen in komplexer Form vor, d.h., es stehen zwei Quadraturkomponenten, zum einen der Real- sowie der Imaginärteil des komplexen Signals zur Verfügung. Die Demodulation erfolgte bisher durch die QAD, so dass eine Auswertung des Signals durch den Betrag und die Phase möglich ist. Die Quadraturkomponenten entsprechen im folgenden Beobachtungsmodell den Beobachtungsgrößen. Die Phasendemodulation wird durch die trigonometrische Beziehung als System eines nichtlinearen Modells dargestellt. Dadurch erweitert sich Gleichung 4.1 durch die nichtlineare Messmatrix $C[x(n)]$ zu

$$y(n) = C[x(n)] + v(n) = \begin{pmatrix} \text{Re}\{y(n)\} \\ \text{Im}\{y(n)\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos[2\pi\alpha \cdot x_1(n)] \\ \sin[2\pi\alpha \cdot x_1(n)] \end{pmatrix} + v(n). \quad (4.3)$$

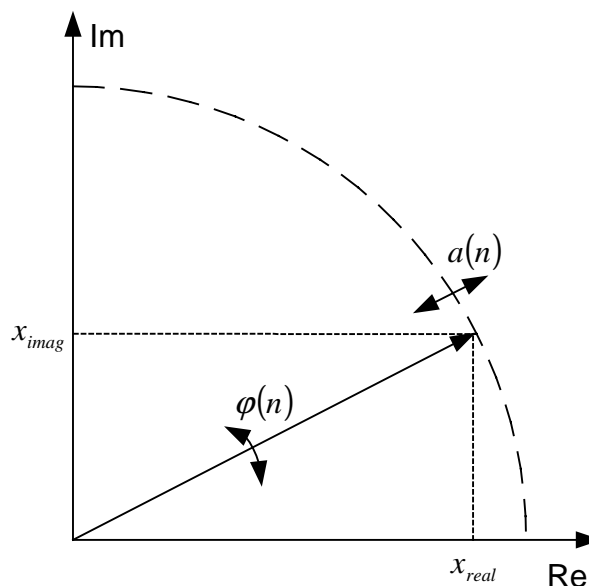


Bild 4.4: Ansatz des Beobachtungsmodells durch trigonometrische Beziehungen.

Die Darstellung in Bild 4.4 verdeutlicht den entsprechenden Ansatz im Beobachtungsmodell. Die Komponenten des Zustandsvektors $x(n)$ entsprechen der im System vorliegenden Phase $\varphi(n) = x_1(n)$ und der Phasenänderung bzw. Frequenz $f(n) = x_2(n)$. Für das Zustandsraummodell wird der Eingangsvektor zu Null gesetzt, da keine Informationen über diese Größe vorliegen. Auch hier wird die Nichtlinearität des Systems berücksichtigt, was sich in der Transitionsmatrix $A[x(n)]$ widerspiegelt. Mit der Gewichtungsmatrix G ergibt sich folgender Zusammenhang:

4 Signalrekonstruktion

$$x(n+1) = A[x(n)] + G \cdot w(n) = \begin{pmatrix} x_1(n) + T \cdot x_2(n) \\ x_2(n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot w(n), \quad (4.4)$$

wobei T die Abtastabstände kennzeichnet. Die nichtlinearen Terme bereiten Probleme bei der Berechnung des Modells. Für die mathematische Behandlung mit den Methoden der Systemtheorie sind lineare Beziehungen jedoch wesentlich günstiger. Die Linearisierung des Modells erfolgt durch die Entwicklung einer Taylor-Reihe, wobei nach dem ersten Glied die Reihe abgebrochen werden kann [14,15]. Die nichtlinearen Terme in Gleichung 4.3 und 4.4 werden durch

$$C[x(n)] = \begin{pmatrix} \cos[2\pi\alpha \cdot x_1(n)] \\ \sin[2\pi\alpha \cdot x_1(n)] \end{pmatrix} \Rightarrow C = \frac{\partial C[x(n)]}{\partial x(n)} = \begin{pmatrix} 1 - 2\pi\alpha & 0 \\ 2\pi\alpha & 0 \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

$$A[x(n)] = \begin{pmatrix} x_1(n) + T \cdot x_2(n) \\ x_2(n) \end{pmatrix} \Rightarrow A = \frac{\partial A[x(n)]}{\partial x(n)} = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.6)$$

linearisiert. Dieser Ansatz dient zur Berechnung des erweiterten Kalmanfilters, das im nächsten Abschnitt vorgestellt werden soll.

4.3 Kalmanfilter

Das Kalmanfilter wird in die Klasse der linearen Optimalfilter eingeordnet [22]. Im diskreten Bereich wurde der Schätzalgorithmus nach der Methode der minimalen Varianz entwickelt [22,15]. Das vorgestellte System entspricht in allgemeiner Form einem nichtlinearen Modell. Eine Erweiterung des Kalmanfilters erfolgt durch den im letzten Abschnitt beschriebenen Linearisierungsprozess [15], im Folgenden mit EKF bezeichnet (extended kalman filter). Ausgehend vom Beobachtungsmodell hat der unbekannte Zustandsvektor den Erwartungswert gleich Null und die Kovarianzmatrix P

$$E[x(n)] = 0, \quad (4.7)$$

$$P\{x(n)\} = E[x(n) \cdot x'(n)]. \quad (4.8)$$

4 Signalrekonstruktion

Der Erwartungswert des Messrauschvektors ist ebenfalls Null und die Messrauschmatrix R entspricht

$$R\{v(n)\} = E[v(n) \cdot v'(n)]. \quad (4.9)$$

Eine weitere Annahme ist, dass der Zustandsvektor $x(n)$ und der Messrauschvektor $v(n)$ unkorreliert sind. Für das Zustandsraummodell ist der Erwartungswert des Prozessrauschvektors Null und die Prozessrauschmatrix entspricht

$$Q\{w(n)\} = E[w(n) \cdot w'(n)]. \quad (4.10)$$

Das EKF ist in erster Näherung eine Lösung für das vorliegende System. Die folgenden Gleichungen charakterisieren das nichtlineare Systemmodell

$$y(n) = \begin{pmatrix} \cos[2\pi\alpha \cdot x_1(n)] \\ \sin[2\pi\alpha \cdot x_1(n)] \end{pmatrix} + v(n), \quad (4.11)$$

$$x(n+1) = \begin{pmatrix} x_1(n) + T \cdot x_2(n) \\ x_2(n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot w(n), \quad (4.12)$$

das durch die Entwicklung einer Taylor-Reihe mit Abbruch nach dem ersten Glied linearisiert wird

$$y(n) = \begin{pmatrix} 1 - 2\pi\alpha \cdot x_1(n) & 0 \\ 2\pi\alpha \cdot x_1(n) & 0 \end{pmatrix} + v(n), \quad (4.13)$$

$$x(n+1) = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot x(n) + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot w(n). \quad (4.14)$$

Die Linearisierung dient zur einfachen Handhabung der mathematischen Beziehungen. Zuerst soll die Funktionsweise eines linearen Filters aufgeführt werden. Das Kalmanfilter ist ein rekursives Filter, das Messfehler sowie a-priori Informationen des dynamischen Systems berücksichtigt und die Zustände nach der

4 Signalrekonstruktion

Methode der minimalen Varianz optimal schätzt. Der Algorithmus ist im folgenden Bild dargestellt.

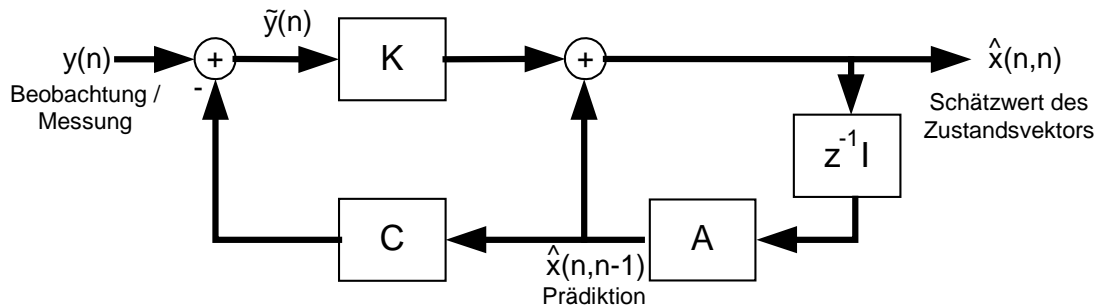


Bild 4.5: Das diskrete Prädiktions-Kalmanfilter.

Als Eingangsgröße steht der verrauschte Beobachtungsvektor $y(n)$ zur Verfügung. K beschreibt die Kalman-Verstärkung, die in Gleichung 4.25 ausführlich hergeleitet wird. Die Ausgangsgröße des Filters entspricht dem Prädiktions-Schätzwert des Zustandsvektors $\hat{x}(n,n)$, der optimal angenähert werden soll. Hier treten zum ersten Mal formale Ausdrücke auf, die zum besseren Verständnis erläutert werden sollen. In der Klammer (ab Gleichung 4.14) treten zwei Ausdrücke auf. Der erste bezieht sich auf den diskreten Zeitpunkt, zu dem ein Ereignis vorliegt, das den an zweiter Stelle stehenden diskreten Beobachtungszeitraum berücksichtigt. Da es sich hier um einen Estimationsprozess handelt, weichen die geschätzten von den tatsächlichen Werten ab. Allgemein lässt sich diese Abweichung durch die Differenz des Ist- und des Sollwertes bestimmen. Die Prädiktion lässt Aussagen über zukünftige Ereignisse zu. Das Filter eignet sich somit zur Vorhersage von Schätzwerten. Die Abweichungen der Prädiktionsschätzfehler werden zu

$$\tilde{x}(n, n-1) = \hat{x}(n, n-1) - x(n), \quad (4.14)$$

ermittelt. Die Abweichung des Schätzfehlers zum Zeitpunkt n wird bestimmt zu

$$\tilde{x}(n, n) = \hat{x}(n, n) - x(n). \quad (4.15)$$

Aus diesen beiden Schätzfehlern lassen sich die zugehörigen Kovarianzmatrizen bestimmen

4 Signalrekonstruktion

$$P(n, n-1) = E[\tilde{x}(n, n-1) \cdot \tilde{x}'(n, n-1)], \quad (4.16)$$

$$P(n, n) = E[\tilde{x}(n, n) \cdot \tilde{x}'(n, n)]. \quad (4.17)$$

Der erste Schätzwert wird aus einem Anfangswert des Zustandes und aus der somit bekannten Kovarianzmatrix ermittelt. Für die Bestimmung jedes weiteren Schätzwertes fließen die zugehörigen Beobachtungen in die Berechnung mit ein. Dieser Vorgang wird bis zur letzten Beobachtung wiederholt, so dass die Anzahl der Schätzwerte denen der Beobachtungen gleichen.

Im ersten Schritt erfolgt die Prädiktion zur Bestimmung des Zustandsvektors im Zustandsraummodell, wobei die gegenwärtige Beobachtung nicht berücksichtigt wird

$$x(n, n) = A \cdot x(n-1, n-1) + G \cdot w(n, n-1). \quad (4.18)$$

Der Prädiktions-Schätzwert wird bestimmt zu

$$\hat{x}(n, n) = A \cdot \hat{x}(n-1, n-1) + K \cdot [y(n) - A \cdot C \cdot \hat{x}(n, n-1)], \quad (4.19)$$

vgl. Bild 4.5. In diesem Fall ergibt sich der Schätzfehler aus

$$\tilde{x}(n, n-1) = \hat{x}(n, n-1) - x(n). \quad (4.20)$$

Unter der Berücksichtigung, dass der Schätzfehler und der Prozessrauschvektor unkorreliert sind und es sich bei diesem außerdem um ein weißes Rauschen handelt, wird die Kovarianzmatrix des Schätzfehlers angegeben zu

$$P(n, n-1) = E[\tilde{x}(n, n-1) \cdot \tilde{x}'(n, n-1)] = A \cdot P(n-1, n-1) \cdot A' + Q. \quad (4.21)$$

Somit ist die Prädiktion und damit der erste Schritt abgeschlossen. Im zweiten Schritt werden die Beobachtungen zur Bestimmung der Schätzwerte berücksichtigt. Vom Beobachtungsmodell ausgehend lässt sich wie im ersten Schritt folgender Ansatz entwickeln

4 Signalrekonstruktion

$$y(n) = C \cdot x(n) + v(n). \quad (4.22)$$

Der Prädiktionswert für die folgende Beobachtung kann durch

$$\hat{y}(n, n-1) = C \cdot \hat{x}(n, n-1) \quad (4.23)$$

bestimmt werden. Die Abweichung zwischen der Beobachtung und deren Prädiktion wird bestimmt zu

$$\tilde{y}(n) = \hat{y}(n, n-1) - y(n). \quad (4.24)$$

Der Schätzwert des Zustandsvektors kann durch einen weiteren Ausdruck verifiziert werden, der als Kalman-Gain bzw. Kalman-Verstärkung bezeichnet wird

$$K(n) = P(n, n-1) \cdot C' \cdot [C \cdot P(n, n-1) \cdot C + R]^{-1}. \quad (4.25)$$

Die Kalman-Verstärkung bestimmt die minimale Varianz, und der rekursive Ansatz der Gleichung ist vergleichbar mit dem des diskreten Kalmanfilters in Bild 4.5. Auch die Bestimmung der Kovarianzmatrix führt zu

$$P(n) = (G - K(n) \cdot C') \cdot P(n, n-1). \quad (4.26)$$

Für eine ausführliche Herleitung sei auf die Fachliteratur verwiesen [22,15]. Eine Erweiterung des linearen Kalmanfilters ist aufgrund der vorherrschenden Nichtlinearitäten im System unverzichtbar. Dies führt zum bereits erwähnten EKF. Auf die Herleitung wird im folgenden verzichtet. Die wichtigsten Gleichungen des EKF sind, wie sie als Algorithmus programmiertechnisch umgesetzt wurden, im Folgenden aufgeführt:

4 Signalrekonstruktion

Eingangsgröße des Prozesses:

Die Quadraturkomponenten des Beobachtungsvektors $y(n)$.

Bekannte Parameter:

Nichtlineare Transitionsmatrix: $A[x(n)]$,

Nichtlineare Messmatrix: $C[x(n)]$,

Korrelationsmatrix des Prozessrauschenvektors: Q ,

Korrelationsmatrix des Messrauschenvektors: R .

Berechnung der diskreten Schritte:

$$K(n) = P(n, n-1) \cdot C' [C \cdot P(n, n-1) \cdot C' + R]^{-1},$$

$$\tilde{y}(n) = C(n, \hat{x}(n, n-1)) - y(n),$$

$$\hat{x}(n, n) = \hat{x}(n, n-1) + K(n) \cdot \tilde{y}(n),$$

$$\hat{x}(n+1, n) = A(n, \hat{x}(n, n)),$$

$$P(n) = (G - K(n) \cdot C') \cdot P(n, n-1),$$

$$P(n+1, n) = A \cdot P(n) \cdot A' + Q.$$

Die linearisierten Matrizen A und C werden durch die Taylor-Reihe der nichtlinearen Matrizen $A[x(n)]$ und $C[x(n)]$ bestimmt. A-priori Informationen können als Initialisierung hilfreich sein, doch um völlig unabhängig zu arbeiten, wird der erste Schätzwert $\hat{x}(1,0)$ zu Null gesetzt.

Das Bild 4.6 spiegelt die o.a. Gleichungen des EKF als Flussdiagramm wider.

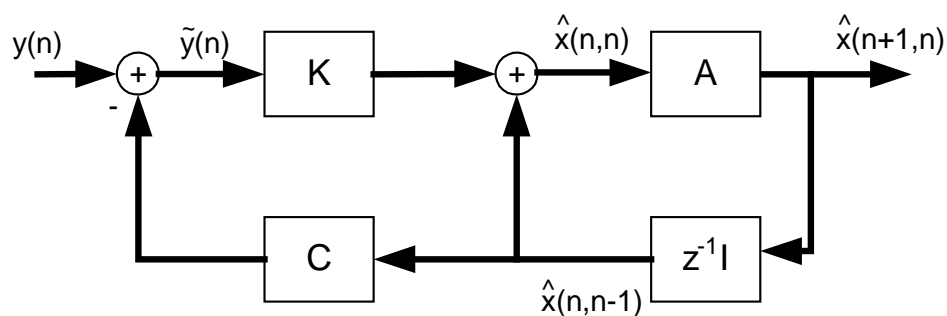


Bild 4.6: Das Prädiktions-EKF [15].

4.4 Komplexe Bandpassabtastung

Die komplexe Bandpassabtastung ermöglicht die Auswertung komplexer Signale nach Amplitude und Phase. Mathematisch lässt sich die Beziehung zwischen Amplitude und Phase in Form eines Zeigers in der komplexen Ebene darstellen:

$$\underline{signal(n)} = amplitude(n) \cdot e^{j \cdot phase(n)} \cdot e^{j \cdot 2\pi f n} \quad (4.27)$$

Die trigonometrische Beziehung des Zeigers in der komplexen Ebene erlaubt eine Aufteilung des Signals in Real- und Imaginärteil, wodurch die Amplitude

$$|amplitude(n)| = \sqrt{signal(n)_{real}^2 + signal(n)_{imag}^2}, \quad (4.28)$$

und die Phase

$$phase(n) = \arctan \frac{signal(n)_{imag}}{signal(n)_{real}}, \quad (4.29)$$

berechnet werden. Die Arctan-Funktion ist nur im Bereich $-\frac{\pi}{2} \leq phase(n) \leq \frac{\pi}{2}$ definiert. Eine Erweiterung des Bereiches auf $-\pi \leq phase(n) \leq \pi$ ist durch die Anwendungen der vier Quadranten inversen Tangensfunktion möglich, die im Folgenden berücksichtigt wird.

Die Ausführung nach dem bisher geschilderten Verfahren ist so nicht durchführbar. Messtechnisch lassen sich nur reale Signalanteile aufnehmen. Somit ist der Imaginärteil des Signals nur dann verwertbar, wenn dieser in einen Realteil überführt wird. Hierzu bedient man sich der Hilbert-Transformation, die den Zusammenhang zwischen Real- und Imaginärteil beschreibt. Die Umsetzung der Hilbert-Transformation ist in Bild 4.7 dargestellt.

4 Signalrekonstruktion

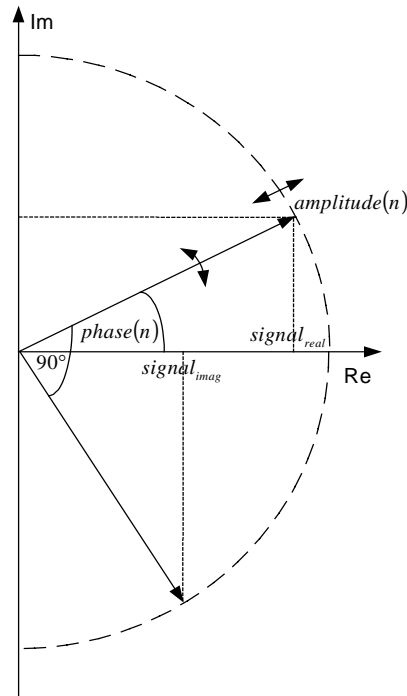


Bild 4.7: Prinzip der komplexen Bandpassabtastung.

Der imaginäre Signalanteil lässt sich dadurch erfassen, indem eine um 90° versetzte Aufnahme durchgeführt wird (Bild 4.7). Die Projektion des Zeigers auf die reelle Achse zum aktuellen Zeitpunkt entspricht derjenigen Projektion auf die imaginäre Achse, die um eine halbe Periodendauer zeitversetzt aufgenommen wird. Dieses Verfahren ist nur dann anwendbar, wenn es sich um schmalbandige Signale handelt und die Bandpassbedingung gewährleistet ist.

Die anschließende Demodulation (QAD) erfolgt durch die Gleichungen 4.28 bzw. 4.29 zur Bestimmung der Amplitude und der Phase.

4.5 Ergebnisse der Phasenrekonstruktion

Viele Untersuchungen und Vergleiche haben aufgezeigt, dass die Informationen, die der Phase eines Ultraschallsignals aufgeprägt werden, eine weitere Signalverarbeitung mit einer eindeutigen Auswertung ermöglichen. In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse für die o.a. Demodulationsverfahren vorgestellt. Neben der QAD, deren Anwendung bisher zu guten Ergebnissen führte, werden vergleichbar die Ergebnisse des neu entwickelten Kalmanfilters dargestellt. Die Darstellungen erfolgen sowohl für die ungestörte als auch für die gestörte Strömung.

4.5.1 Die ungestörte Strömung

Das Ultraschallsignal wird durch die in der Strömung vorherrschenden natürlichen Strukturen moduliert (vgl. Kapitel 3). Ungestörte Strömungen sind dadurch charakterisiert, dass die Modulationsintensität nicht sehr hoch ist, dieser aber mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit linear ansteigt [26].

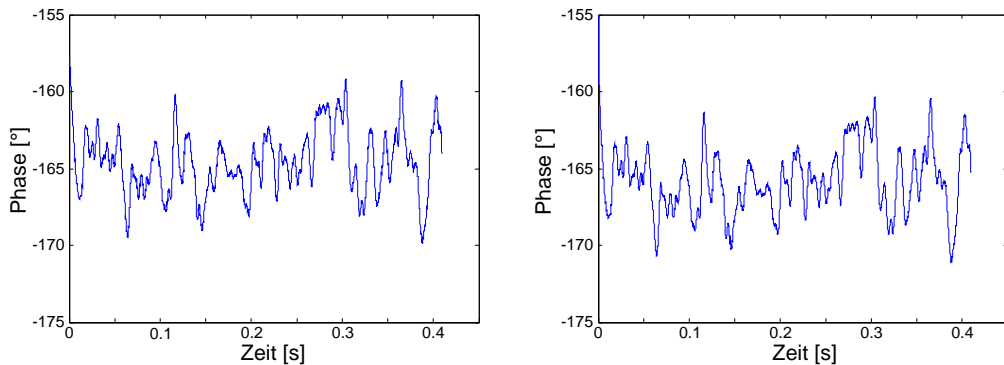


Bild 4.8: *Rekonstruktion der Phase mittels QAD (links) bzw. Kalmanfilter (rechts) bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s .*

Der Vergleich beider Phasenrekonstruktionen weist keine unterschiedlichen Merkmale auf. Der Phasenverlauf ist für beide Demodulationsverfahren identisch. Ein Unterschied zwischen dem Kalmanfilter und der QAD ist erst bei höheren Geschwindigkeiten zu verzeichnen. Die in Bild 4.9 dargestellten Verläufe zeigen die Phasendemodulation bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s , wobei eine höhere Auflösung einen besseren Vergleich zulässt.

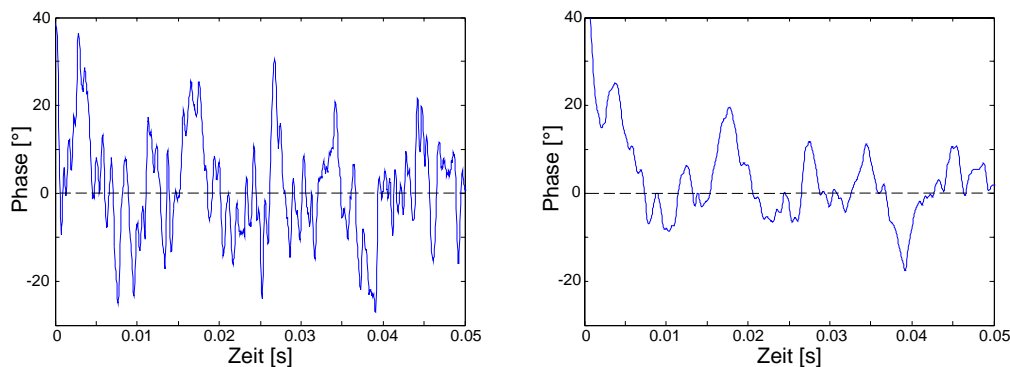


Bild 4.9: *Rekonstruktion der Phase mittels QAD (links) bzw. Kalmanfilter (rechts) bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s .*

4 Signalrekonstruktion

Das Kalmanfilter entrauscht das rekonstruierte Phasensignal, wodurch eine bessere Signalverarbeitung möglich ist. Mit der Erhöhung der Modulationsintensität weicht die Rekonstruktion durch das Kalmanfilter von derjenigen durch die QAD ab, wobei der Verlauf einer Mittelwertbildung entspricht. Zurückzuführen ist diese Mittelwertbildung auf den implementierten Algorithmus, der den Phasenverlauf durch Schätzung rekonstruiert.

4.5.2 Die gestörte Strömung

Installationen, wie z.B. Einfach- und Raumkrümmer (eine ausführlichere Beschreibung erfolgt in Kapitel 6) führen zu Störungen in der Strömung, die einen zusätzlichen Einfluss auf das Ultraschallsignal aufzeigen. Der Phasenhub nimmt schon bei niedrigen Geschwindigkeiten vergleichbare Werte wie bei der ungestörten Strömung für hohe Geschwindigkeiten an. Auch am Beispiel der Phasendemodulation hinter einem Einfachkrümmer ermöglicht das Kalmanfilter eine zur QAD konforme Rekonstruktion für größere Phasenhübe (Bild 4.10).

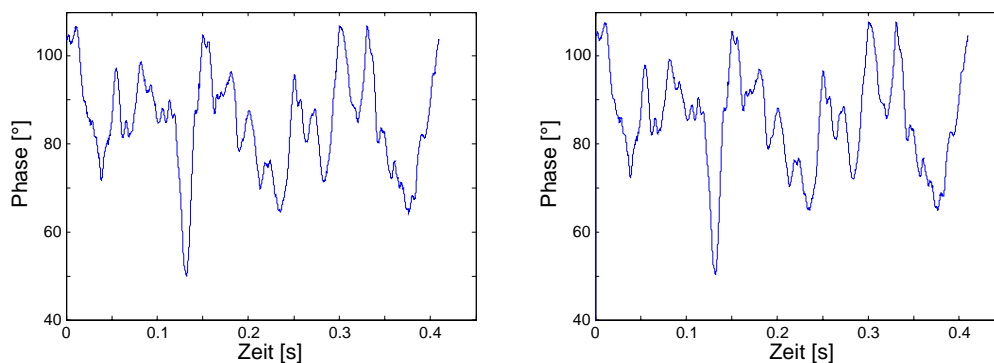


Bild 4.10: Rekonstruktion der Phase mittels QAD (links) bzw. Kalmanfilter (rechts) bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s .

Mit Zunahme der Geschwindigkeit erhöht sich ebenfalls die Modulationsintensität. Liegen Störungen vor, wird das Ultraschallsignal stärker moduliert. Dies führt bei der QAD zu Phasensprüngen aufgrund des eingeschränkten Wertevorrates (s. Abschnitt 4.4). Eine weitere Signalverarbeitung ist in diesem Fall nicht möglich und eine Abhilfe leistet die von [26] entwickelte Nullphasenkorrektur. Aussagefähiger ist der Rekonstruktionsverlauf durch die Anwendung des Kalmanfilters. Wie schon in Bild

4 Signalrekonstruktion

4.9 dargestellt, wird der Phasenverlauf gemittelt rekonstruiert. Bild 4.11 gibt Aufschluss über die Rekonstruktion der Phase.

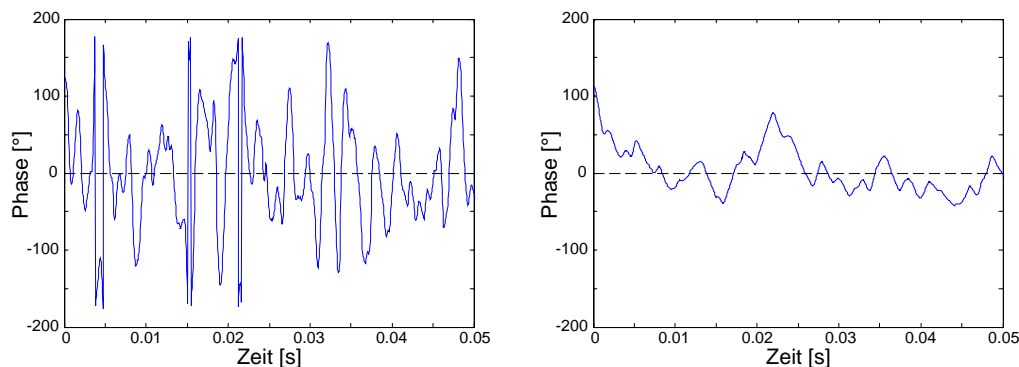


Bild 4.11: Rekonstruktion der Phase mittels QAD (links) bzw. Kalmanfilter (rechts) bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s .

Der Wertevorrat der 4-Quadranten inversen Tangensfunktion wird mit zunehmender Geschwindigkeit durch die hohe Modulationsintensität überschritten (Bild 4.11, links). Die Darstellung berücksichtigt bereits die Nullphasenkorrektur von [26]. Die Rekonstruktion durch das Kalmanfilter fängt hohe Modulationsintensitäten durch Mittelung zwischen zwei Werten ab. Diese Verfahrensweise unterdrückt unnatürliche Phasensprünge, und es wird eine durchgehende Rekonstruktion des Phasensignals ermöglicht. Demodulierte Phasenverläufe hinter Raumkrümmern sind mit denen hinter Einfachkrümmern vergleichbar, womit auf weitere Darstellungen verzichtet wird.

Eine weitere Form der Störung in Strömungen stellt die Vortexmessung dar. Hier wird bewusst ein Störkörper in die Strömung eingebracht, wodurch sich periodisch Wirbel ablösen. Dieser Effekt wird zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit genutzt (eine ausführliche Beschreibung zur Vortexmessung erfolgt in Kapitel 6). Die Phasenrekonstruktion erfolgt am Beispiel einer M10-Gewindestange.

4 Signalrekonstruktion

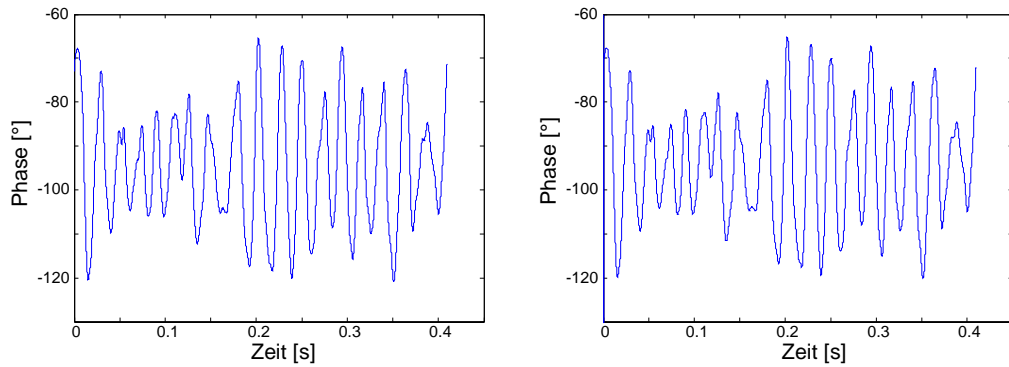


Bild 4.12: *Rekonstruktion der Phase mittels QAD (links) bzw. Kalmanfilter (rechts) bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s .*

Auch in diesem Beispiel lässt sich kein Unterschied für niedrige Geschwindigkeiten feststellen. Die periodische Wirbelablösung ist im Phasensignal eindeutig zu erkennen, deren Frequenz charakteristisch für die vorherrschende Strömungsgeschwindigkeit ist. Die Intensität der Modulation durch die Wirbelbildung ist ebenfalls beträchtlich. Die Erhöhung der Geschwindigkeit führt bei der QAD zur Überschreitung des Wertevorrates (Bild 4.13, links). Die Rekonstruktion des Kalmanfilters weicht vom rekonstruierten Verlauf der QAD ab. Die Grundschiwingung zur Auswertung der Wirbelfrequenz wird ohne Sprünge dargestellt (Bild 4.13, rechts).

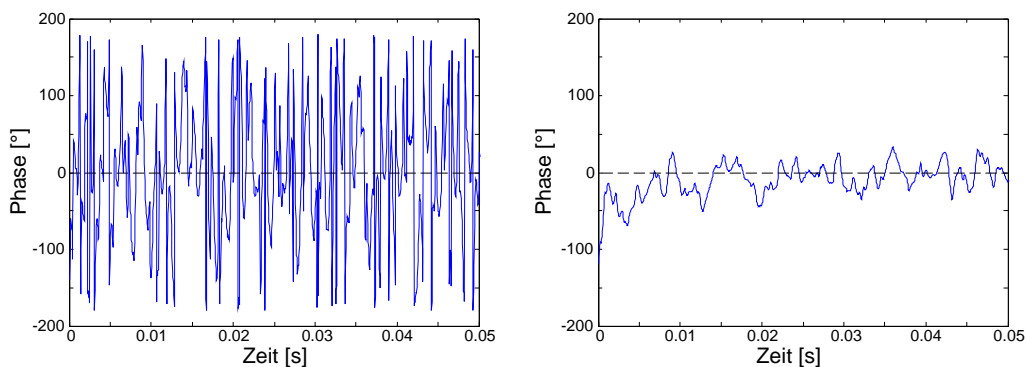


Bild 4.13: *Rekonstruktion der Phase mittels QAD (links) bzw. Kalmanfilter (rechts) bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s .*

Auch die Pulsation wirkt sich störend in Form von diskontinuierlich geförderten Volumenpaketen auf die Strömung aus. Am Beispiel eines mitlaufenden Drehkolbenzählers wird der Einfluss der Pulsation auf das Ultraschallsignal in Bild 4.14 bei einer Geschwindigkeit von 15 m/s deutlich.

4 Signalrekonstruktion

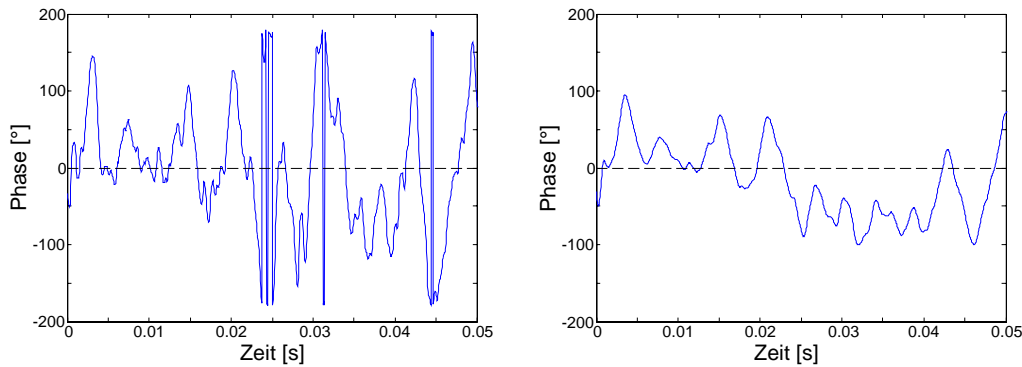


Bild 4.14: *Rekonstruktion der Phase mittels QAD (links) bzw. Kalmanfilter (rechts) bei einer pulsierenden Strömung und einer Geschwindigkeit von 15 m/s .*

Durch die diskontinuierliche Bewegung der Strömungen sind charakteristische Frequenzen im Signal enthalten. Die Grundschiwingung in Bild 4.14, in beiden Rekonstruktionen zu erkennen, entspricht der Pulsationsfrequenz des Drehkolbenzählers. Höhere Frequenzen im Signal entsprechen den zugehörigen Oberwellen.

Weitere Untersuchungen zur Anwendung des Kalmanfilters und dessen Ergebnisse bezogen auf die Korrelationstechnik bzw. Vortexmessung sind in den jeweiligen Kapiteln aufgeführt. Die aufgestellten Hypothesen zu den reell rekonstruierten Phasenverläufe werden im nächsten Abschnitt anhand von Simulationen überprüft.

4.6 Simulation des demodulierten Signalverlaufs

Das Kalmanfilter hat sich für unterschiedliche Modulationsintensitäten unter Berücksichtigung reeller Signale zur Rekonstruktion des Phasenverlaufs bestens bewährt. Jedoch traten für hohe Geschwindigkeiten Phasenverläufe auf, die mit dem durch die QAD rekonstruierten Verlauf der Phase keine Gemeinsamkeiten aufzeigten. Die QAD ist in ihrem Wertevorrat eingeschränkt, was bei hohen Modulationsintensitäten zu Phasensprüngen führt. Beim Kalmanfilter handelt es sich um einen Schätzer. Eine Simulation der Rekonstruktion des demodulierten Signalverlaufs gibt Aufschluss über die Leistungsfähigkeit des Kalmanfilters bei vorgegebener Modulation durch bekannte Signalformen.

4 Signalrekonstruktion

Die Leistungsfähigkeit eines jeweiligen Systems kann durch Simulationen überprüft und ggf. optimiert werden. Zunächst erfolgt die Bewertung des Kalmanfilters an einem unmodulierten Sinussignal. Die Simulation wird der praktischen Durchführung angepasst. Es wird ein Trägersignal mit einer Frequenz von $f_T = 220\text{kHz}$ generiert und mittels komplexer Bandpassabtastung mit $f_A = 20\text{kHz}$ unterabgetastet. Die Implementierung der Hilbert-Transformation ermöglicht die Überführung des Signals in eine komplexe Form, wodurch die QAD angewandt werden kann. Durch die Unterabtastung wird die Trägerfrequenz eliminiert, und es steht nur die Phaseninformation zur Verfügung. Da es sich um ein unmoduliertes Testsignal handelt, kann kein Phasenverlauf dargestellt werden. Dies äußert sich sowohl für die QAD als auch für das Kalmanfilter in Form einer Geraden mit $\varphi = 0^\circ$.

Das unmodulierte Signal wird für die weiteren Untersuchungen der Phase mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen von $f_{PM} = 20\text{Hz}$ und $f_{PM} = 200\text{Hz}$ variiert. Die entsprechende Modulationsfrequenz lässt sich im Zeitsignal des jeweiligen Phasenverlaufs wiederfinden. Sowohl die QAD als auch das Kalmanfilter rekonstruieren eindeutig das Modulationssignal. In Abhängigkeit von der Modulationsintensität überschreiten die durch die QAD rekonstruierten Phasenverläufe mit zunehmender Modulationsintensität m den definierten Wertebereich, wodurch Phasensprünge erzeugt werden (Bild 4.15).

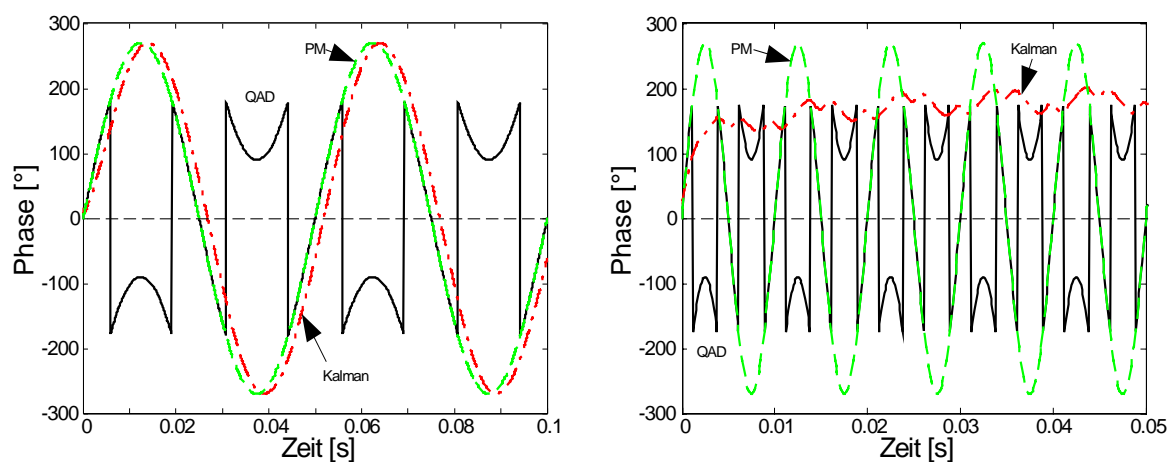


Bild 4.15: Rekonstruktion des Phasenverlaufs der phasenmodulierten Sinusschwingung bei einer Modulationsfrequenz von $f_{PM} = 20\text{Hz}$ und

$$f_{PM} = 200\text{Hz} \text{ bei einer Modulationsintensität von } m = \frac{3\pi}{2}.$$

4 Signalrekonstruktion

Das Kalmanfilter rekonstruiert zwar die modulierende Frequenz, die Amplitude des Phasenwinkels nimmt aber mit zunehmender Modulationsfrequenz ab. Zusätzlich tritt zu Beginn ein Einschwingvorgang aufgrund des gewählten Algorithmus auf, wodurch eine zeitversetzte Darstellung in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz erfolgt. Die Einschwingzeit ist abhängig von der Modulationsintensität, die proportional zunimmt. Die Vorteile des Kalmanfilters sind für grosse Modulationsintensitäten zu erkennen (Bild 4.15), da der Verlauf unabhängig von Phasensprüngen geschätzt wird. Die Abnahme der Amplitude des Phasenwinkels kommt der geschätzten Rekonstruktion mit zunehmender Modulationsfrequenz zugute.

In der Praxis wird nicht nur die Phase, sondern gleichzeitig die Amplitude moduliert. Die Einflüsse auf den Phasenverlauf beider Parameter werden sowohl für das phasen- als auch für das amplitudenmodulierte Sinussignal mit den bereits aufgeführten Modulationsfrequenzen simuliert. Die Darstellung der Ergebnisse der Simulationen des komplex modulierten Signals erfolgen in Bild 4.16 bis 4.19.

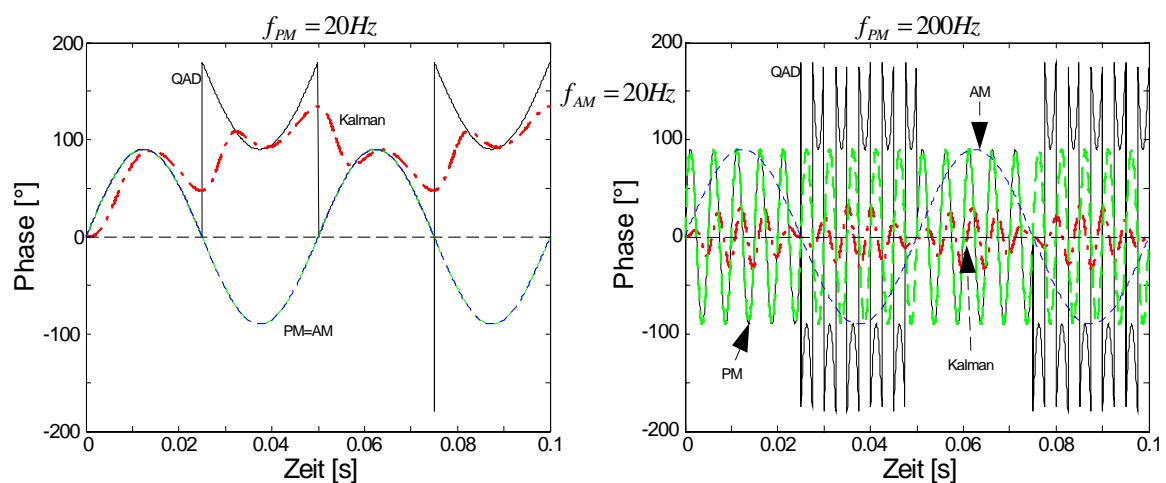


Bild 4.16: Rekonstruktion des Phasenverlaufs durch die QAD bzw. das Kalmanfilter für das komplex modulierte Signal bei unterschiedlicher

PM, konstanter AM und einer Modulationsintensität von $m = \frac{\pi}{2}$.

In Bild 4.16 wird der Einfluss der komplexen Modulation durch die variierende PM bei einer gleichzeitig vorherrschenden AM mit $f_{AM} = 20Hz$ dargestellt. Die Rekonstruktion des Phasenverlaufs durch die QAD erfolgt sprunghaft. Es liegt eine Beeinflussung durch die AM vor, was auf die komplexe Bandpassabtastung

4 Signalrekonstruktion

zurückzuführen ist, bei der in Abhängigkeit der AM ein Vorzeichenwechsel stattfindet und dadurch Phasensprünge um $\varphi = 180^\circ$ rekonstruiert werden. Das Kalmanfilter wird deutlicher von der AM angesprochen. Das Kalmanfilter folgt dem Verlauf der QAD. Mit ansteigender Frequenz der Phasenmodulation wird mit jedem Vorzeichenwechsel der AM ein Phasensprung erzeugt. Dies ist auf die reelle Abtastung zurückzuführen. Sind beide Modulationsfrequenzen identisch, erfolgt eine teilweise Überlappung der vorliegenden Frequenzen.

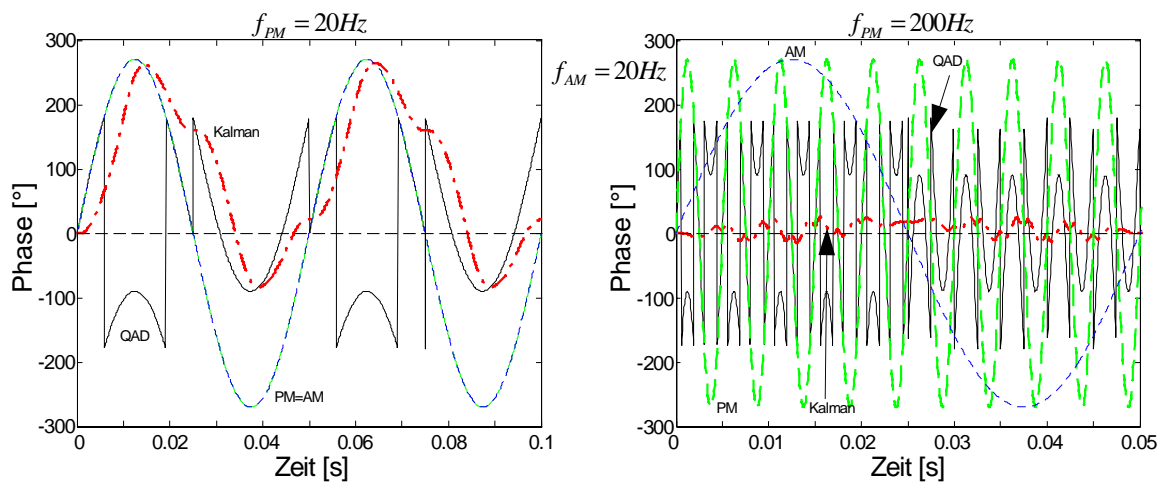


Bild 4.17: Rekonstruktion des Phasenverlaufs durch die QAD bzw. das Kalmanfilter für das komplex modulierte Signal bei unterschiedlicher

PM, konstanter AM und einer Modulationsintensität von $m = \frac{3\pi}{2}$.

Mit ansteigender Modulationsintensität (Bild 4.17) rekonstruiert die QAD Phasensprünge, die bei Anwendung eines Kalmanfilters kompensiert werden. Eine Erhöhung der PM-Frequenz bei gleichbleibender AM-Frequenz wird durch das Kalmanfilter richtig rekonstruiert, eingebettet als Schwebung der AM-Frequenz, deutlicher in Bild 4.16 zu erkennen. In diesem Beispiel resultieren die Abweichungen im Phasenverlauf durch den Einfluss der AM.

Erfolgt eine Erhöhung der AM-Frequenz bei niedriger PM-Frequenz wird derselbe Effekt wie zuvor realisiert (Bild 4.18).

4 Signalrekonstruktion

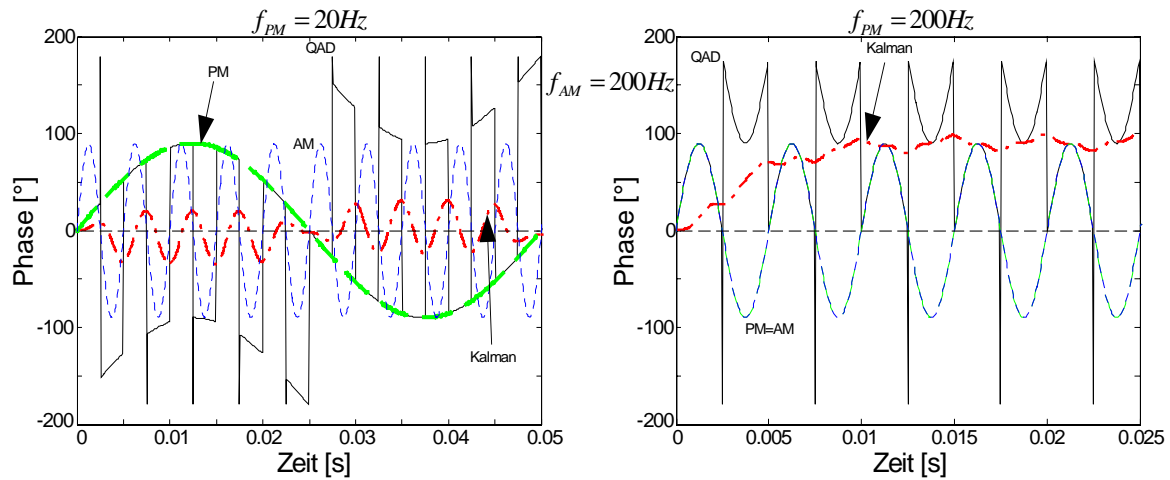


Bild 4.18: Rekonstruktion des Phasenverlaufs durch die QAD bzw. das Kalmanfilter für das komplex modulierte Signal bei unterschiedlicher

PM, konstanter AM und einer Modulationsintensität von $m = \frac{\pi}{2}$.

Der durch das Kalmanfilter rekonstruierte Verlauf entspricht diesmal der AM-Frequenz und der PM-Frequenz als Einhüllende. Sind die Frequenzen der PM und AM identisch ist die Darstellung in Bild 4.18 konform zu Bild 4.16. Auch in Bild 4.19 werden bei einer grösseren Modulationsintensität identische Verhältnisse wie in Bild 4.18 dargestellt.

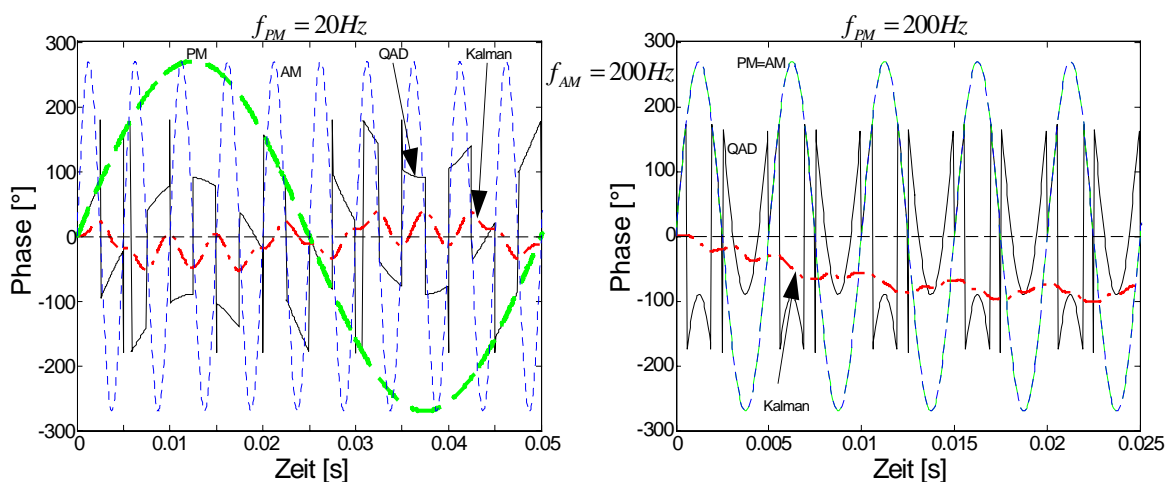


Bild 4.19: Rekonstruktion des Phasenverlaufs durch die QAD bzw. das Kalmanfilter für das komplex modulierte Signal bei unterschiedlicher

PM, konstanter AM und einer Modulationsintensität von $m = \frac{3\pi}{2}$.

4 Signalrekonstruktion

Die gewonnenen Erkenntnisse der Simulation spiegeln sich in den unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Rekonstruktionsverfahren wider. Die Simulation der QAD zeigt auf, dass der Phasenverlauf nicht eindeutig bestimmt wird. Dies liegt an der komplexen Bandpassabtastung, wodurch der Einfluss der AM einen Vorzeichenwechsel in der Phasenrekonstruktion bewirkt. In Abhängigkeit von der Abtastung spielt die Beeinflussung der AM in der Rekonstruktion eine entscheidende Rolle, was in der Simulation dargestellt wurde. Das Kalmanfilter paßt sich bei komplexer Modulation und gleichen Frequenzen dem Verlauf der QAD an. Es sei nochmals erwähnt, dass es sich um ein Schätzverfahren handelt, das aus der reellen Abtastung resultiert. Die extremen Unterschiede zwischen den beiden beispielhaft gewählten Modulationsfrequenzen treten in dieser Form in der Praxis nicht auf. Ein relativ stabiler Rekonstruktionsverlauf konnte dennoch erzielt werden, insbesondere in Verbindung mit hohen Modulationsintensitäten. Praktische Rekonstruktionsbeispiele sind bereits in Abschnitt 4.5 aufgeführt worden, wodurch für niedrige Frequenzen keine Probleme auftraten. Auch der Einfluss der AM ist in den reellen Signalen bei der Rekonstruktion nicht darstellbar. Die Simulation konnte einen Trend des Kalmanfilters darstellen. Positiver überzeugt das Kalmanfilter in der praktischen Anwendung, was sich in der Komplexität und nicht eindeutig zu simulierenden reellen Signalen widerspiegelt. Inwiefern sich dieses Systemverhalten in der Praxis auf die Signalverarbeitung auswirkt, wird im nächsten Kapitel dargestellt.

Die Erwartung der QAD, unbeeinflusst von der AM, den Phasenverlauf zu rekonstruieren, wurde in der Simulation nicht bestätigt. Es herrscht eine Beeinflussung vor, die zumindest bei hohen Modulationsintensitäten zu fehlerhaften Phasenverläufen führt, wodurch eine weitere Signalverarbeitung nicht möglich ist. Die Simulation ist für extreme Frequenzunterschiede der einzelnen Modulationskomponenten durchgeführt worden, die in dieser Art in der Praxis nicht auftreten können.

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

5.1 Das kreuzkorrelative Messverfahren

An dieser Stelle sei nochmals auf den in Kapitel 2 aufgeführten Stand der Technik verwiesen, in dem das Messprinzip der korrelativen Messung beschrieben wurde. Ausführliche Untersuchungen zur Korrelationstechnik wurden bereits in den Arbeiten von [36] und [26] durchgeführt, so dass sich dieser Abschnitt im wesentlichen mit den in Kapitel 4 formulierten Fragen und der Auswertung der Ergebnisse durch das neue Demodulationsverfahren beschäftigt. Ein Vergleich zur bisher angewandten QAD soll die Verwendungsmöglichkeit des Kalmanfilters, insbesondere für gestörte Strömungen, zeigen [11].

Im zweiten Abschnitt werden dreidimensionale Darstellungen der Geschwindigkeitsprofile präsentiert. Zum ersten Mal erfolgt eine tomographische Profilerstellung durch die korrelative Geschwindigkeitsbestimmung. Es werden Algorithmen zur tomographischen Rekonstruktion und zugehörige Ergebnisse sowohl für die ungestörte als auch gestörte Strömung vorgestellt [7,8].

5.1.1 Auswertung der demodulierten Ultraschallsignale

Bei der Durchschallung der Strömung werden dem Ultraschallsignal charakteristische Muster aufgeprägt, die sich in Form einer Modulation sowohl im Amplituden- als auch im Phasensignal äußern. Zur Auswertung eignet sich besonders die Phase mit einem höheren Informationsgehalt, die zu einem besseren Ergebnis führt [36,26].

5.1.1.1 Die ungestörte Strömung

Die Bildung der Kreuzkorrelation zweier phasendemodulierter Ultraschallsignale liefert den in Bild 5.1 dargestellten Verlauf. Die Laufzeit zwischen beiden Ultraschallschranken entspricht dem sich in der Korrelationsfunktion ergebenden Maximum. Mit Hilfe des bekannten Schrankenabstandes wird die Strömungsgeschwindigkeit nach Gl. 2.2 berechnet. Für die ungestörte Strömung erweist sich das Kalmanfilter trotz der in der Simulation aufgezeigten Schwächen als gleichwertiges Demodulationsverfahren zur QAD. Ein Unterschied bei niedrigen

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Geschwindigkeiten ist im Verlauf der KKF nicht zu erkennen, da die Signale übereinander liegen.

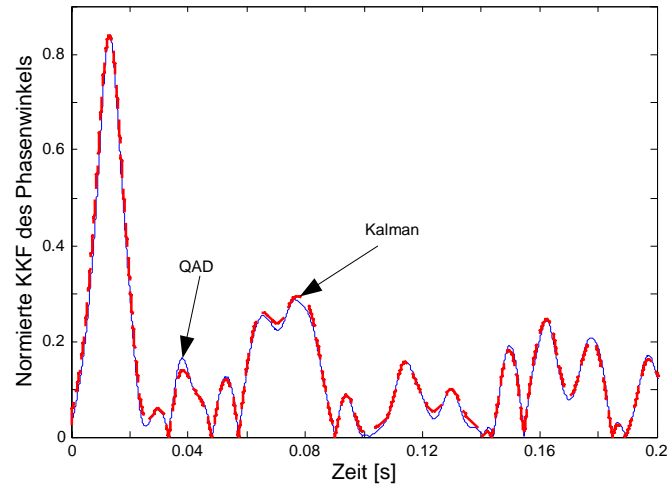


Bild 5.1: Bestimmung der Laufzeit mit Hilfe der KKF für die ungestörte Strömung bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s .

Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt die Modulationsintensität zu, ebenso die Bandbreite des Signals. Das Kalmanfilter rekonstruiert den Mittelwert des Phasensignals, durch die gestrichelte Darstellung in Bild 5.2 zu erkennen.

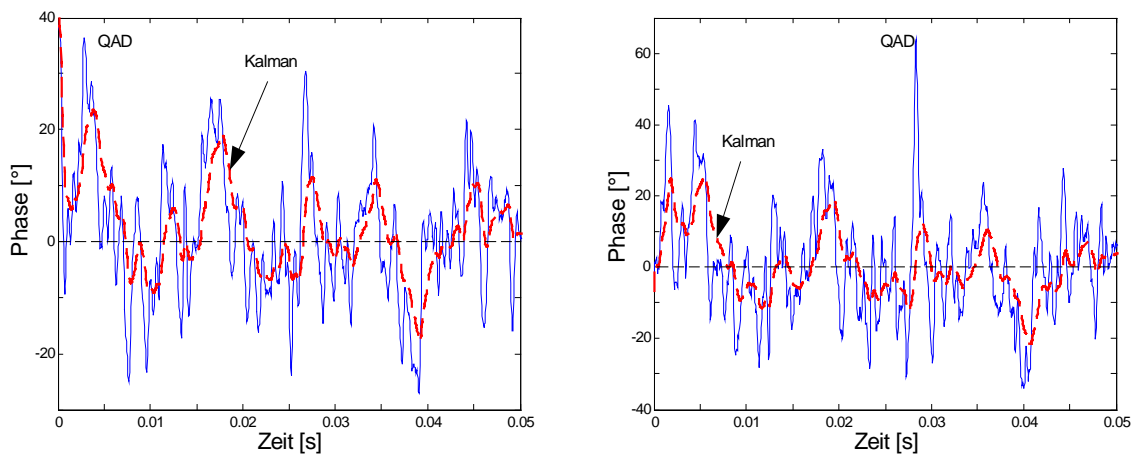


Bild 5.2: Phasensignal der ersten Schranke (links) und der zweiten Schranke (rechts) für die ungestörte Strömung bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s .

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Die KKF vergleicht beide Signale auf ähnliche charakteristische Merkmale. Der Unterschied des Demodulationsverfahrens macht sich erst durch diesen Vergleich bemerkbar. Die Mittelwertbildung des Kalmanfilter zeigt eine bessere Übereinstimmung beider Signale mit einem höheren Korrelationsmaximum als durch die bisher angewandte QAD (Bild 5.3).

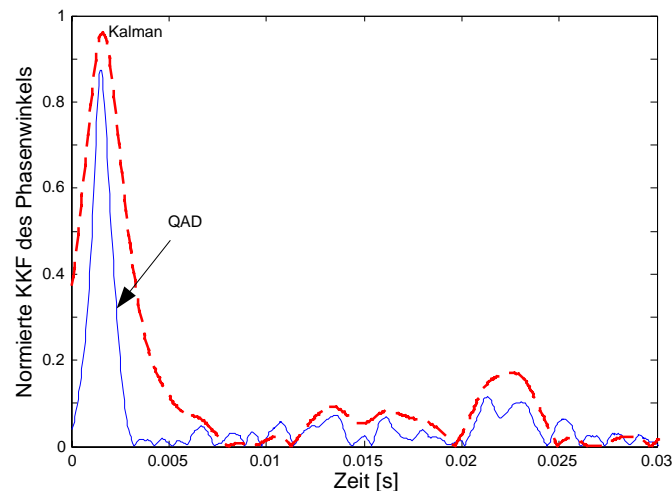


Bild 5.3: Bestimmung der Laufzeit mit Hilfe der KKF für die ungestörte Strömung bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s der in Bild 5.2 demodulierten Phasensignale.

Die Darstellung zeigt deutlich, daß bei der Anwendung des Kalmanfilters ein besseres Ergebnis erzielt wird.

5.1.1.2 Die gestörte Strömung

Bei der Voruntersuchung für niedrige Geschwindigkeiten und damit verbunden eine schmalbandige Modulation hat die Rekonstruktion des Phasensignals bereits in Kapitel 4 keine wesentlichen Unterschiede aufgezeigt. Interessanter gestaltet sich die Frage der Demodulation bei hohen Geschwindigkeiten für die gestörte Strömung. Der Definitionsbereich der QAD wird eindeutig überschritten, wodurch die Ähnlichkeit beim Vergleich beider Signale abnimmt. Dieser eingeschränkte Bereich reicht dennoch für die weitere Signalverarbeitung aus (Bild 5.4).

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

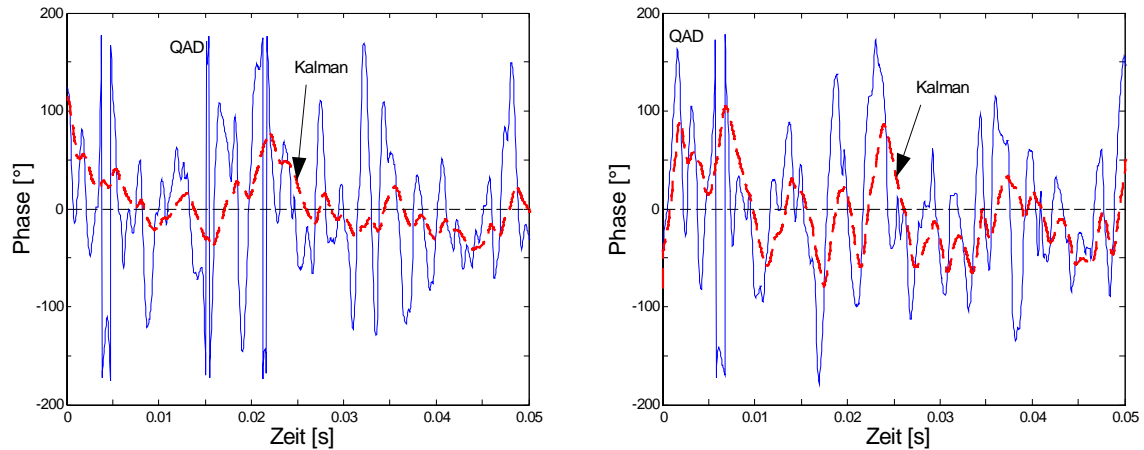


Bild 5.4: Phasensignal der ersten Schranke (links) und der zweiten Schranke (rechts) für die gestörte Strömung hinter einem Einfachkrümmer bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s .

Bild 5.5 zeigt die Laufzeitbestimmung am Beispiel einer durch einen Einfachkrümmer gestörte Strömung.

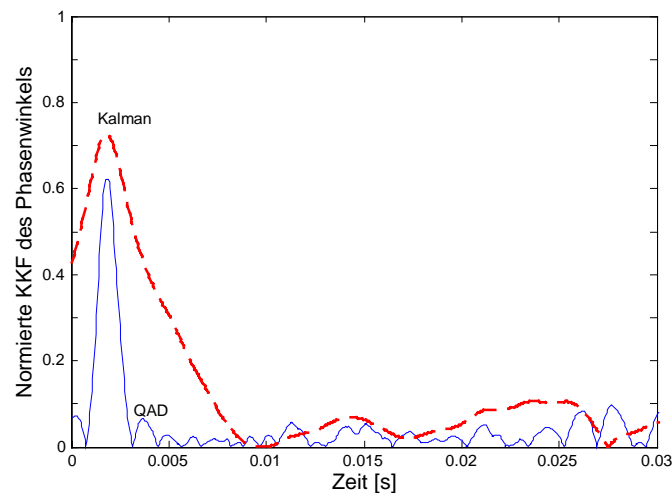


Bild 5.5: Bestimmung der Laufzeit mit Hilfe der KKF für die gestörte Strömung hinter einem Einfachkrümmer bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s der in Bild 5.4 demodulierten Phasensignale.

Auch Raumkrümmer erzeugen eine Störung in der Strömung. Die demodulierten Signale sind mit denen hinter dem Einfachkrümmer identisch. Am Beispiel des Einfachkrümmers ist der Unterschied zwischen beiden Demodulationsverfahren erkennbar. Durch die Mittelwertbildung des Kalmanfilters können bei hohen

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Modulationsintensitäten unnatürliche Phasensprünge unterdrückt werden, woraus ein höheres Korrelationsmaximum resultiert. Die Breite der KKF ist von großer Bedeutung. Mit zunehmender Modulationsintensität wird der Zeitverlauf mittels Kalmanfilter demodulierter Phasensignale breiter. In der Breite der KKF spiegelt sich die Schätzung des Turbulenzgrades wider [34]. Vom mathematischen Aspekt zu urteilen, wird das Maximum der Laufzeit eindeutiger durch das Kalmanfilter bestimmt, die Physik der Turbulenzen wird durch den Kalmanfilter-Algorithmus unterdrückt. Das Kalmanfilter stellt einen Tiefpaß dar, woraus ein breiterer Verlauf der KKF resultiert.

Bei den in Bild 5.2 und 5.4 rekonstruierten Phasenverläufen wurde die von [26] entwickelte Nullphasenkorrektur berücksichtigt. Durch die unbekannte Phasenlage der Sensoren muß eine Nullphasenkorrektur bei der Anwendung der QAD für eine bessere Signalverarbeitung durchgeführt werden. Eine erneute Darstellung des Ergebnisses hinter einem Einfachkrümmer erfolgt unter Ausschluß der Nullphasenkorrektur in Bild 5.6.

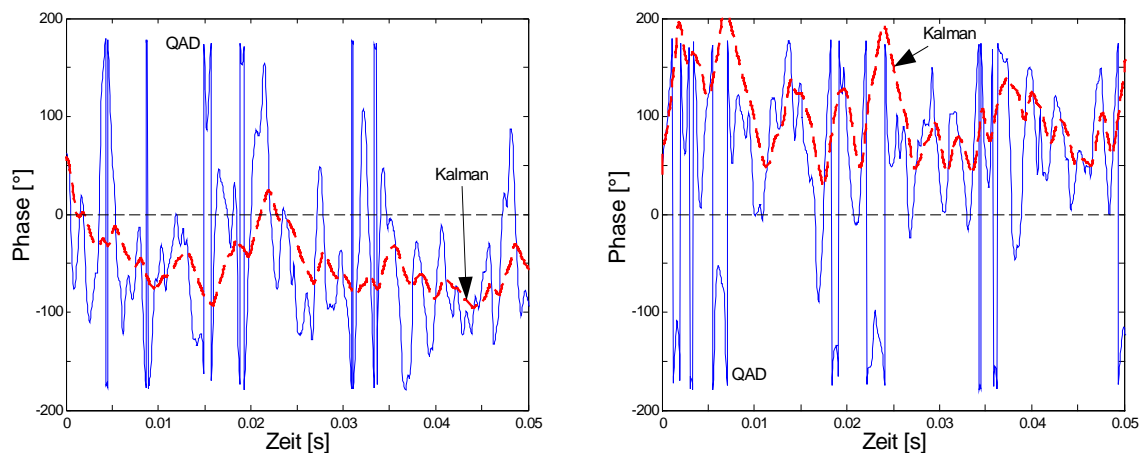


Bild 5.6: *Phasensignal der ersten Schranke (links) und der zweiten Schranke (rechts) für die gestörte Strömung hinter einem Einfachkrümmer unter Ausschluß der Nullphasenkorrektur bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s .*

Der Einfluss der Nullphasenkorrektur macht sich in der Höhe des Maximums in der KKF bemerkbar. Den Beweis dafür stellt der Vergleich der Bilder 5.5 und 5.7 dar.

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

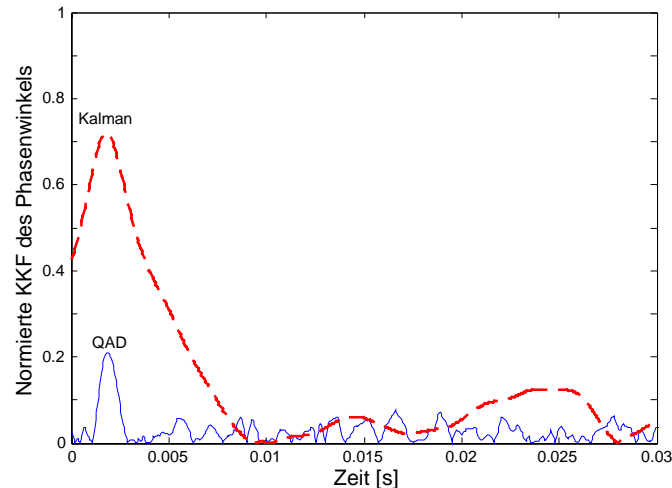


Bild 5.7: Bestimmung der Laufzeit mit Hilfe der KKF für die gestörte Strömung hinter einem Einfachkrümmer unter Ausschluß der Nullphasenkorrektur bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s . der in Bild 5.6 demodulierten Phasensignale.

Die Anwendung des Kalmanfilters zur Demodulation bleibt unbeeinflusst von der Position der Sensoren. Der Berechnungsaufwand für das Kalmanfilter kann durch den Ausschluß der Nullphasenkorrektur um einen Berechnungsschritt reduziert werden. Auch die pulsierende Strömung, generiert durch einen passiv betriebenen Drehkolbenzähler, stellt eine Beeinflussung der Strömung dar. Bild 5.8 zeigt die demodulierten Phasensignale unter Ausschluß der Nullphasenkorrektur.

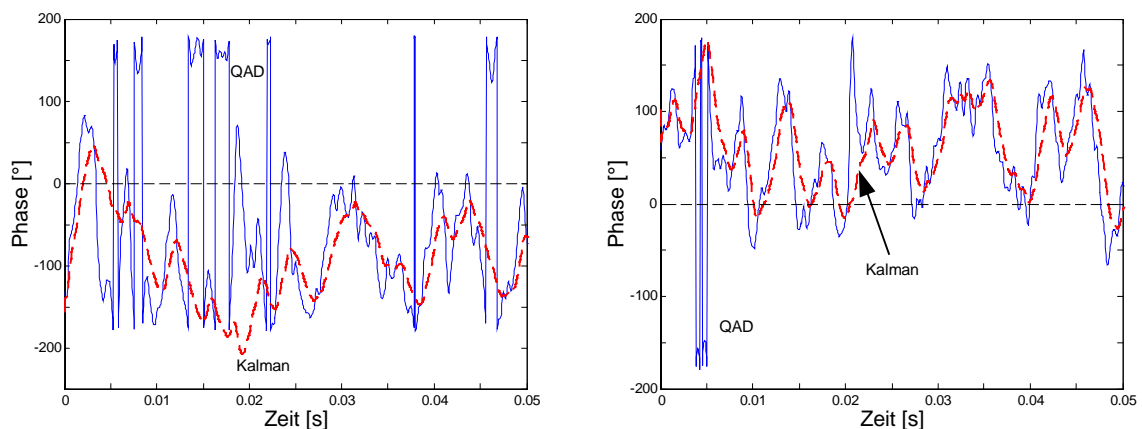


Bild 5.8: Phasensignal der ersten Schranke (links) und der zweiten Schranke (rechts) für die gestörte Strömung generiert durch einen Drehkolbenzähler unter Ausschluß der Nullphasenkorrektur bei einer Geschwindigkeit von 15 m/s .

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Durch die intensive Beeinflussung des Drehkolbenzählers läßt die Demodulation mittels QAD unter Ausschluß der Nullphasenkorrektur keine Ähnlichkeit zwischen beiden Signalen erkennen und bei der Berücksichtigung der Nullphasenkorrektur wird ein Maximum in der KKF dargestellt (Bild 5.9). Das Kalmanfilter bleibt unbeeinflusst vom Einwirken der Störung auf die Signale und weist ein Maximum in der KKF auf.

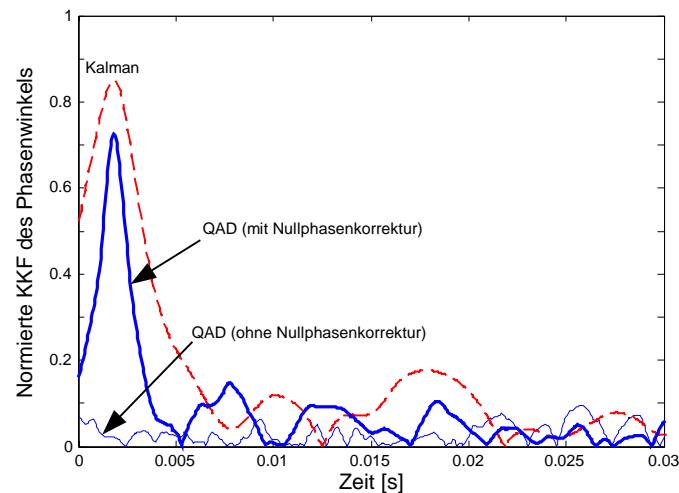


Bild 5.9: Bestimmung der Laufzeit mit Hilfe der KKF für die gestörte Strömung generiert durch einen Drehkolbenzähler bei einer Geschwindigkeit von 15 m/s der in Bild 5.8 demodulierten Phasensignale.

Das neue Demodulationsverfahren stellt eine Alternative zur bisher angewandten QAD dar. Die Vorteile bestehen in der Rekonstruktion von Phasensignalen mit hohen Modulationsintensitäten. Beim Einsatz des Kalmanfilters kann auf eine Nullphasenkorrektur verzichtet werden. Nachteilig für dieses Verfahren wirkt sich die um die 10-fache längere Berechnungszeit zur QAD aus, die aus dem komplex aufgebauten Rekonstruktionsalgorithmus resultiert. Im mathematischen Sinne wird ein höheres Maximum in der KKF erzielt, was der weiteren Signalverarbeitung zugute kommt. Durch die Schätzung der Signalform insbesondere bei hohen Modulationsintensitäten gehen Informationen über die physikalischen Turbulenzverhältnisse verloren. Sie sind für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit aber ohnehin von geringer Bedeutung. Die Grenzen des Kalmanfilters konnten beim korrelativen Messprinzip noch nicht aufgezeigt werden. Eine weitere Untersuchung im Bereich der Vortexmessung erfolgt in Kapitel 6.

5.2 *Dreidimensionale Darstellung des Geschwindigkeitsprofils*

Tomographische Darstellungen, die in der Medizintechnik weit verbreitet sind, ermöglichen Einblicke in unzugängliche Bereiche. Auch in der Strömungstechnik ist die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung über den Rohrquerschnitt für viele Prozesse von Bedeutung. Zur Darstellung tomographischer Abbildungen werden einerseits Informationen über das zu untersuchende Messgebiet benötigt, andererseits müssen diese Informationen mittels Rekonstruktionsalgorithmen sinnvoll verarbeitet werden.

Von *Skwarek* wurde die Hypothese aufgestellt [36], dass die in der Strömung befindlichen Strukturen mit der am häufigsten auftretenden Geschwindigkeit das Signal modulieren. *Schneider* [32] und *Niemann* [26] haben diese Aussage mit ihren Untersuchungen bestätigt, dass es sich um den Wert mit der größten Wahrscheinlichkeit handelt, der durch die Korrelation gemessen wird. Im Falle der Tomographie entspricht die verwertbare Information der korrelativ ermittelten Geschwindigkeit zwischen den beiden Schranken. Es stellt sich die Frage, in welcher Anordnung die Schranken bzw. Pfade gewählt werden sollen, um die größtmögliche Anzahl an Informationen über das Messgebiet zu erhalten. Die geeignete Wahl der Applikation wird im nächsten Abschnitt vorgestellt. Aufgrund des relativ geringen Informationsgehaltes müssen für die Darstellung geeignete Algorithmen gefunden werden, die ebenfalls ausführlich in den nächsten Abschnitten behandelt werden.

5.2.1 Das Prinzip der Tomographie

Die Informationen für die Tomographie werden durch die korrelative Geschwindigkeitsbestimmung der vorliegenden Pfade geliefert. Von Interesse ist es, die wahre Geschwindigkeit entlang des Messpfades zu erhalten und nicht die Bestimmung des Modalwertes. In vielen Veröffentlichungen über die Tomographie trat immer wieder ein wesentliches Linienintegral auf, das Radon durch seine bekannte Transformation eingeführt hat. Eine physikalische Größe kann als skalare Größe in jedem Punkt eines beliebigen Integrals bestimmt werden [31]. Dazu wird das bestehende Koordinatensystem um den Winkel ϑ gedreht. Somit entspricht die Radontransformierte der Größe $f(x, y)$ dem folgenden definierten Linienintegral

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

$$F(l, \vartheta) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int f(x, y) \delta(x \cos \vartheta + y \sin \vartheta - l) dx dy. \quad (5.1)$$

Die Wirksamkeit der Tomographie liegt in dieser Gleichung. Mit ausreichender Kenntnis einer bestimmten Anzahl von Projektionen $F(l, \vartheta)$ ist es möglich, Rückschlüsse auf die physikalische Ausgangsgröße f zu ziehen.

Für die Anwendung der Ultraschalltomographie ist es ausreichend, den numerischen Wert der korrelativ bestimmten Geschwindigkeit mit dem obigen Ausdruck gleichzusetzen. Die Geschwindigkeit entspricht einer vektoriellen Größe, die sich punktuell aus Skalaren zusammensetzt. Die zur Verfügung stehenden Informationen sind an dieser Stelle zu gering, um jeden Punkt in der Abbildungsebene eindeutig bestimmen zu können. In diesem Zusammenhang bleibt es zu klären, wie die Messpfade über den Rohrquerschnitt verlaufen sollten, um einen möglichst hohen Informationsgehalt über den Messbereich zu erhalten. Dies soll im folgenden Abschnitt geklärt werden.

5.2.2 Aufbau der Messkammer

Die Wahl der Messkammer und der damit verbundenen Sensoranordnung stellt ein wichtiges Kriterium dar. Der wichtigste Aspekt ist, dass sich das rekonstruierte dem tatsächlichen Profil umso besser annähert, je mehr Informationen über das Messgebiet (Strömungsquerschnitt) vorliegen. Allerdings sind hier Grenzen gesetzt. Der Umfang der Strömungsröhre sowie der Durchmesser der eingesetzten Ultraschallwandler bestimmen die maximale Anzahl der Sensoren, die in einer Messkammer untergebracht werden können. Die begrenzte Anzahl von Sensoren spiegelt die Anzahl der Integrallinien wider, wodurch die Rekonstruktion beeinflusst wird. Im nächsten Abschnitt werden unterschiedliche Rekonstruktionsalgorithmen aufgeführt, die auf Anwendbarkeit untersucht werden.

Pro Schranke wurde eine unsymmetrische Anordnung von 5 Sender-Empfänger-Paaren gewählt (Bild 5.10). Die Drehung der Messkammer von 0° bis 360° in 90° -Schritten erlaubt eine Aufnahme von 20 Messpfaden über den gesamten Rohrquerschnitt.



Bild 5.10: Messkammer mit unsymmetrischer Sensoranordnung.

Basierend auf der korrelativen Geschwindigkeitsbestimmung zwischen zwei Schranken erlaubt die Tomographie die Rekonstruktion der Strömungsgeschwindigkeit über den gesamten Strömungsquerschnitt. Die zur Verfügung stehenden Informationen sind zu gering. Für die Darstellung sind geeignete Algorithmen zu finden, die sowohl in ungestörten als auch in gestörten Strömungen die rekonstruierten Profile richtig wiedergeben.

5.3 Rekonstruktionsalgorithmen

Für die Lösung des bestehenden Problems, eine geeignete Methode für die tomographische Rekonstruktion zu finden, steht nur eine geringe Anzahl von Projektionen zur Verfügung und damit verbunden ein geringer Informationsgehalt. Die folgenden Abschnitte zeigen Vor- und Nachteile verschiedener Algorithmen auf, die eine Rekonstruktion des Strömungsprofils, bestehend aus wenigen Projektionen, ermöglichen. Die Untersuchung der Algorithmen erfolgt anhand eines quadratförmig aufgespannten Messbereichs, woraus eine Matrix $M^{p \times p}$ mit $n = p^2$ Pixeln, von links nach rechts bzw. von unten nach oben gezählt, resultiert.

5.3.1 Die Algebraische Rekonstruktionstechnik (ART)

Die ART stellt den „Klassiker“ unter den Rekonstruktionsalgorithmen dar. Jedes Pixel, das von einem Projektionsstrahl getroffen wird, besitzt eine Information in der

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Größenordnung der korrelativ ermittelten Geschwindigkeit. Alle anderen Pixel haben den Wert Null, somit liegen keine für die Rekonstruktion verwertbaren Informationen über diese Bildelemente vor. Die Problematik der ART besteht darin, dass die zu lösenden Gleichungssysteme überbestimmt bleiben, d.h. die Anzahl der Messpfade sollte größer oder gleich groß der Anzahl der Bildelemente sein. Ein unterbestimmtes Gleichungssystem hat die zu Beginn erwähnte Problematik der informationslosen Pixel zur Folge.

Die Aufstellung der Gleichungssysteme ist einfach zu realisieren. Die Projektionsdaten in der Rekonstruktion berechnen sich mit dem Gewichtungsfaktor a_{ij} multipliziert mit den Werten der Bildelemente (Pixel) x_j zu

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j = g_j, \quad (5.2)$$

so dass sich ein Gleichungssystem der Form

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \Lambda & a_{1,n} \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ a_{m,1} & \Lambda & a_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \mathbf{M} \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ \mathbf{M} \\ g_n \end{pmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \underline{\underline{A}} \cdot \underline{x} = \underline{g}, \quad (5.3)$$

mit A als Projektionsmatrix der Gewichtungsfaktoren, x als Bildvektor und g als Projektionsvektor, ergibt [5]. Dieses unterbesetzte Gleichungssystem wird iterativ gelöst. Einen allgemeinen Ansatz liefert [19] mit

$$x_j^{k+1} = x_j^k + \frac{w_i - a_i^T \cdot x_j}{a_i^T \cdot a_i} a_i \quad \text{mit } i = 1 \dots n \text{ und } j = 1 \dots n, \quad (5.4)$$

wobei w_i dem korrelativ bestimmten Wert entspricht. Da das vorliegende Gleichungssystem unterbestimmt ist und somit nur einigen Bildelementen ein diskreter Wert zugewiesen werden kann, erfolgt über das restliche informationslose Messgebiet keine weitere Aussage. Eine Abhilfe schafft in diesem Fall nur eine Approximation über das gesamte Messgebiet mit den diskreten Werten als Stützwerte.

5.3.2 Das Kollokationsverfahren

Das hier aufgeführte Kollokationsverfahren wird als Linearkombination einer großen Anzahl detailarmer, stetiger Ansatzfunktionen gewählt. Die Aufteilung der Bildelemente von $1...n$ findet hier ebenso Anwendung, wie zuvor bei der ART. Als Ansatz wird eine Funktion

$$\varphi_k = e^{-\lambda|x-x_k|}, \quad (5.5)$$

gewählt. Die Größe x entspricht einem Vektor und x_k dem Maximum im k -ten Bildelement, woraus sich die einzelnen Werte φ_k in jedem Bildelement bestimmen lassen. Der Index k symbolisiert die Anzahl der Bildelemente. Bei der Größe λ handelt es sich um einen Parameter, der den Abfall vom Maximum mit wachsender Entfernung bestimmt. Als Beispiel dient die folgende Darstellung mit nur einem Maximum im Mittelpunkt der Abbildungsebene.

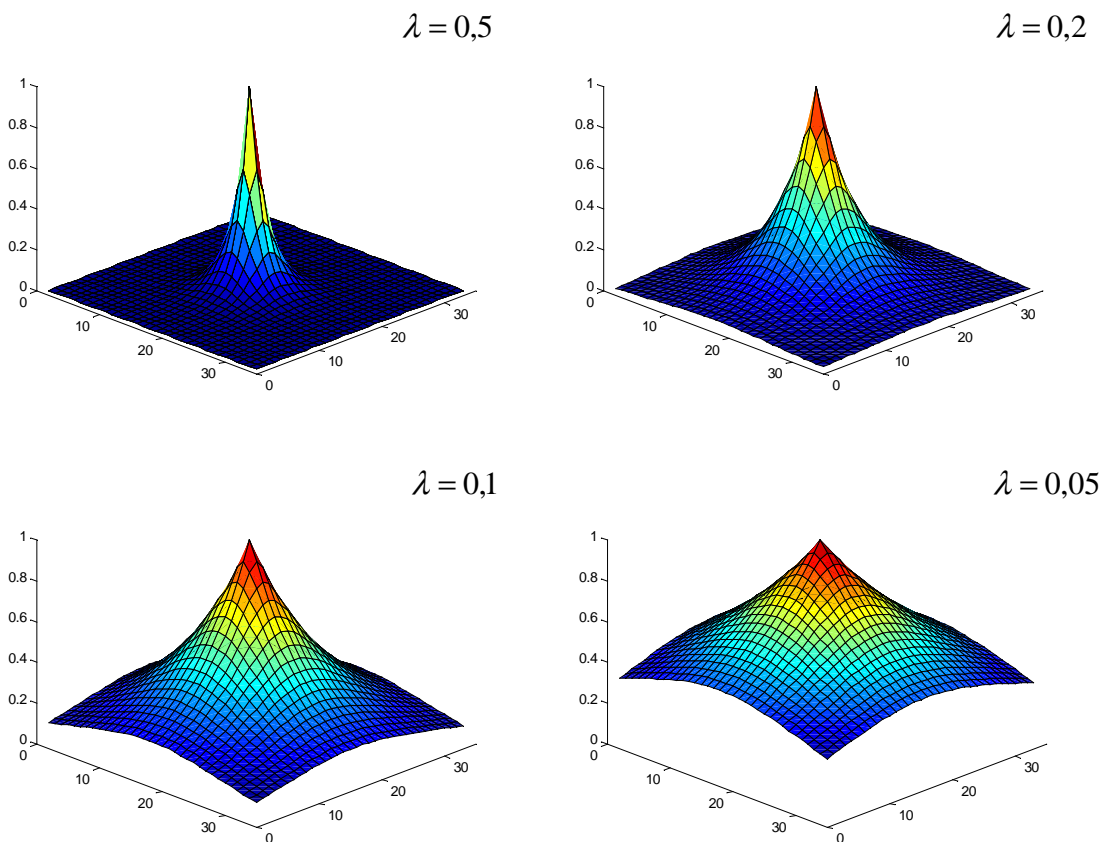


Bild 5.11: Die Ansatzfunktion φ_k wird mit unterschiedlichen Parametern von links dargestellt, mit einem Maximum im Mittelpunkt der Abbildungsebene.

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Der Einfluss des Relaxationsparameters λ ist eindeutig zu erkennen. Je kleiner dieser Wert gewählt wird, desto mehr wird die Peripherie um den Maximalwert beeinflusst. Die Wahl dieser Ansatzfunktion lässt sich durch die physikalischen Gegebenheiten in der Rohrströmung erklären. Der Schalldruck vom Sender zum Empfänger lässt sich durch die Gl. 3.6 berechnen, d.h. dieser Gleichung liegt eine Exponentialfunktion mit einem Dämpfungskoeffizienten, einschließlich orts- und zeitabhängiger Parametern, zu Grunde. Dieser Ansatz ist in der obigen Gleichung wiederzufinden, wobei der Parameter λ die Dämpfungseigenschaft charakterisiert. Durch die Konformität ist die Wahl der Ansatzfunktion gerechtfertigt. Der vollständige Ansatz lautet

$$\tilde{f}(x) = \sum_{k=1}^n \xi_k e^{-\lambda|x-x_k|}, \quad (5.6)$$

als Linearkombination vorgegebener Funktionen φ_k . Die Auswahl der Koeffizienten ξ_k sollte so getroffen werden, dass die Bedingung

$$\int_{L_l} \tilde{f}(x) dx \approx \int_{L_l} f(x) dx \quad (5.7)$$

mit $l = 1 \dots m$ möglichst gut erfüllt wird. Durch die in Gl. 5.7 aufgestellte Bedingung ist die folgende Definition möglich

$$g_l = \int_{L_l} \tilde{f}(x) dx \approx \int_{L_l} f(x) dx = \int_{L_l} \sum_{k=1}^n \xi_k e^{-\lambda|x-x_k|} = \sum_{k=1}^n \xi_k \cdot \int_{L_l} e^{-\lambda|x-x_k|}, \quad (5.8)$$

mit

$$\int_{L_l} e^{-\lambda|x-x_k|} =: a_{lk}, \quad (5.9)$$

so dass vergleichbar mit Gl. 5.2 der Ansatz

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

$$g_l = \sum_{k=1}^n \xi_k a_{lk} \quad \text{mit } l = 1 \dots m, \quad (5.10)$$

bestimmt werden kann. Wie bei der ART wird ein Gleichungssystem mit m Gleichungen und n Unbekannten aufgestellt

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{\xi}} = \underline{\underline{g}}. \quad (5.11)$$

Die Matrixschreibweise der Gl. 5.11 lautet

$$\underline{\underline{A}} := (a_{lk})_{\substack{l=1 \dots m \\ k=1 \dots n}} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & \Lambda & a_{1,n} \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ a_{m,1} & \Lambda & a_{m,n} \end{pmatrix} \quad \underline{\underline{\xi}} := \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \mathbf{M} \\ \xi_n \end{pmatrix} \quad \underline{\underline{g}} := \begin{pmatrix} g_1 \\ \mathbf{M} \\ g_m \end{pmatrix}. \quad (5.12)$$

Im vorliegenden Fall ist das Gleichungssystem unterbestimmt. Durch die Verwendung der Kleinste-Quadrate-Methode lässt sich dieses Gleichungssystem mit Hilfe der Singulärwertzerlegung berechnen [35].

Der Berechnungsvorgang lässt sich wie folgt durchführen. Die Matrix A wird aus den Ansatzfunktionen der vorliegenden Messpfade berechnet. Das Maximum des jeweiligen Messpfades ist mittig angeordnet. Hieraus werden zunächst die orthogonalen Matrizen U und V bestimmt, deren Spalten als Vektoren senkrecht aufeinander stehen und die Norm 1 haben. Dabei entspricht die Matrix U der Größenordnung $m \times m$ und die Matrix V der Größenordnung $n \times n$. Mit diesen orthogonalen Matrizen lässt sich eine Matrix Σ der Größenordnung $m \times n$ bestimmen, die nur Werte auf der Hauptdiagonalen besitzt, die sog. Singulärwerte $\sigma_{1,1} \geq \sigma_{1,1} \geq \dots \sigma_{1,1} \geq 0$.

$$\underline{\underline{U}}^T \underline{\underline{A}} \underline{\underline{V}} = \underline{\underline{\Sigma}} \quad \text{bzw.} \quad (U_{m,m})^T (a_{m,n}) (V_{n,n}) = (\sigma_{m,n}). \quad (5.13)$$

Rückblickend auf die Gl. 5.6 ist eine Größe noch unbekannt geblieben. Es handelt sich um den Koeffizienten ξ_k , der noch unbestimmt ist. Durch die nun bekannten

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Singulärwerte und die orthogonalen Matrizen ist für die Bestimmung der Koeffizienten der Ansatz nach *Sielschott* [35] gegeben

$$\xi_k = \sum_{j=1}^m F_{\gamma}(\sigma_j) \cdot (u_j, g) \cdot v_{kj} . \quad (5.14)$$

Eine kurze Erklärung der einzelnen aufgeführten Größen in dieser Gleichung soll den Zusammenhang verdeutlichen. v_j charakterisiert die einzelnen Spaltenvektoren der Matrix V , ξ entspricht ebenfalls einem Vektor, der sich aus k -Elementen zusammensetzt, die mit Gl. 5.14 berechnet werden.

$$v_j := \begin{pmatrix} v_{1j} \\ \mathbf{M} \\ v_{nj} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \xi = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \mathbf{M} \\ \xi_n \end{pmatrix} . \quad (5.15)$$

Die Funktion $F_{\gamma}(\sigma)$ ist eine Regularisierungsfunktion, die dem Tikhonov-Phillips-Filter entspricht mit dem Regularisierungsfaktor γ

$$F_{\gamma}^{TP}(\sigma_j) = \frac{\sigma_j^2}{\sigma_j^2 + \gamma} , \quad (5.16)$$

was durch

$$F_{\gamma}^{TP}(\sigma_j) = \begin{cases} 1 \text{ für "grosse" } \sigma_j & \text{bzw. } \sigma_j > \gamma \\ 0 \text{ für "kleine" } \sigma_j & \sigma_j \leq \gamma \end{cases} , \quad (5.17)$$

vereinfacht werden kann [35]. Das Produkt (u_j, g) spiegelt die Gewichtung der einzelnen Messungen wider, die sich folgendermaßen darstellen lässt:

$$(u_j, g) = \sum_{l=1}^m u_{lj} \cdot g_l = u_{1j} \cdot g_1 + u_{2j} \cdot g_2 + \dots + u_{mj} \cdot g_m . \quad (5.18)$$

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Alle Größen zur Berechnung des Koeffizienten ξ_k sind ermittelt, wodurch die Rekonstruktion $\tilde{f}(x)$ nach Gl. 5.6 erfolgen kann.

5.3.3 Ein einfaches Interpolationsverfahren zur schnellen tomographischen Darstellung

Das im folgenden beschriebene Verfahren ist nur im weitesten Sinne mit den üblichen bekannten und bereits schon dargestellten Rekonstruktionsalgorithmen verwandt. Analog zum Kollokationsverfahren wird die korrelativ ermittelte Geschwindigkeit mittig als Maximum des zugehörigen Messpfades angeordnet. Diese Maxima sollen im folgenden als Mittelpunkte bezeichnet werden. Mittels dieser Information lässt sich mit diskreten Stützstellen bzw. Stützwerten eine Interpolation über den gesamten Messbereich durchführen. Ein Ansatz von *Nougier* [27] zur zweidimensionalen Interpolation beschreibt, dass, falls Stützwerte u_k , den Geschwindigkeiten entsprechend, in mehreren Bildpunkten $M_k(x_k, y_k)$ gegeben sind, sich die Werte über das gesamte Messgebiet durch m Funktionen $F_k(x, y)$ bestimmen lassen, wobei sich m hier auf die Anzahl der Mittelpunkte bezieht. D.h. die Geschwindigkeit wird durch die Gleichung

$$u(x, y) = \sum_{k=1}^m F_k(x, y) \cdot u_k, \quad (5.19)$$

berechnet. Die Geschwindigkeiten in den Mittelpunkten entsprechen den korrelativ bestimmten Werten entlang der Messpfade, so dass sich ein Geschwindigkeitsvektor

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ \mathbf{M} \\ u_m \end{pmatrix}, \quad (5.20)$$

ergibt. Die Anzahl der bereitzustellenden, voneinander unabhängigen Funktionen entspricht der Anzahl der Mittelpunkte. Beispielsweise können diese für 5 Mittelpunkte folgendermaßen gewählt werden

$$F^T(x, y) = [1 \quad x \quad y \quad x^2 \quad y^2]. \quad (5.21)$$

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Die Interpolation über den gesamten Messbereich erfolgt anschließend über die Gleichung

$$u(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & y^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & y_3^2 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4^2 & y_4^2 \\ 1 & x_5 & y_5 & x_5^2 & y_5^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{pmatrix}. \quad (5.22)$$

Die mit Indizes versehenen x- und y-Größen stellen die Koordinaten des jeweiligen betrachteten Mittelpunktes dar. Diese Gleichung kann nur dann aufgestellt werden, wenn die Effekte, die in der Strömung auftreten, wie z.B. die Schallbeugung, vernachlässigt werden, so dass immer ein und derselbe Mittelpunkt als Stützstelle zur Berechnung dient. Die Korrektur dieser Stützstellen kann durch das Verfahren des Raytracings vorgenommen werden, das an dieser Stelle nicht durchgeführt wurde.

5.4 Rekonstruktionen mit verschiedenen Algorithmen

Die Tomographie rekonstruiert physikalische Größen in einem bestimmten gewählten Messbereich. Durchführbar sind diese Rekonstruktionen anhand unterschiedlicher Algorithmen, die in den letzten Abschnitten vorgestellt wurden und nun anhand von Ergebnissen verglichen werden sollen.

5.4.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Leistungsfähigkeit der einzelnen aufgestellten Algorithmen wird im Folgenden beurteilt. Das untersuchte Messgebiet besteht aus $n = 100$ Bildelementen (Pixeln), dieses entspricht einer Matrix der Größenordnung $p \times p = 10 \times 10$.

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

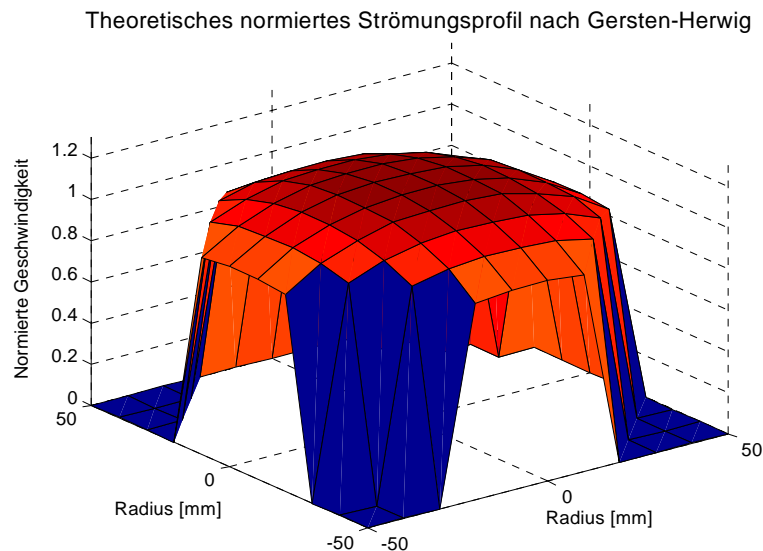


Bild 5.12: Kreisförmige Abbildungsebene in der 10x10 - Matrix.

Durch die vorgegebene Geometrie der betrachteten Strömungsröhre reduziert sich die Abbildungsebene vom quadratischen auf einen kreisförmigen Querschnitt, so dass ein kleiner Teil der Bildelemente außerhalb der Strömungsröhre liegt, die den Wert Null annehmen. Diese Vorabinformation wird auch als a-priori bezeichnet, d.h. es handelt sich um Zusatzinformationen, die neben den Messdaten über das zu rekonstruierende Bild vorliegen. Als Anschauungsbeispiel wird das normierte Strömungsprofil nach *Gersten - Herwig* [13] verwendet, das auch im weiteren Verlauf als Referenz für das ungestörte, voll ausgebildete Strömungsprofil dient (Bild 5.12).

Die Auswertung erfolgt bei einer mittleren Geschwindigkeit von $u_m = 10 \text{ m/s}$. Aufgrund des überbestimmten Gleichungssystems liegen über der gesamten Abbildungsebene Informationen vor, die eine realistische Darstellung des Profils zulassen. Somit entsteht eine Projektion, die sich alleine durch die Informationen über die aufgenommenen Messgrößen ergibt. Das Geschwindigkeitsprofil einer ungestörten, voll ausgebildeten Strömung kann in guter Näherung sowohl durch das Kollokations-, als auch durch das Interpolationsverfahren rekonstruiert werden. Das Maximum wird eindeutig auf der Rohrachse wiedererkannt, und es werden die zu den Eckpunkten verlaufenden Gradienten im Vergleich zum theoretischen Verlauf relativ gut angenähert (Bild 5.13).

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

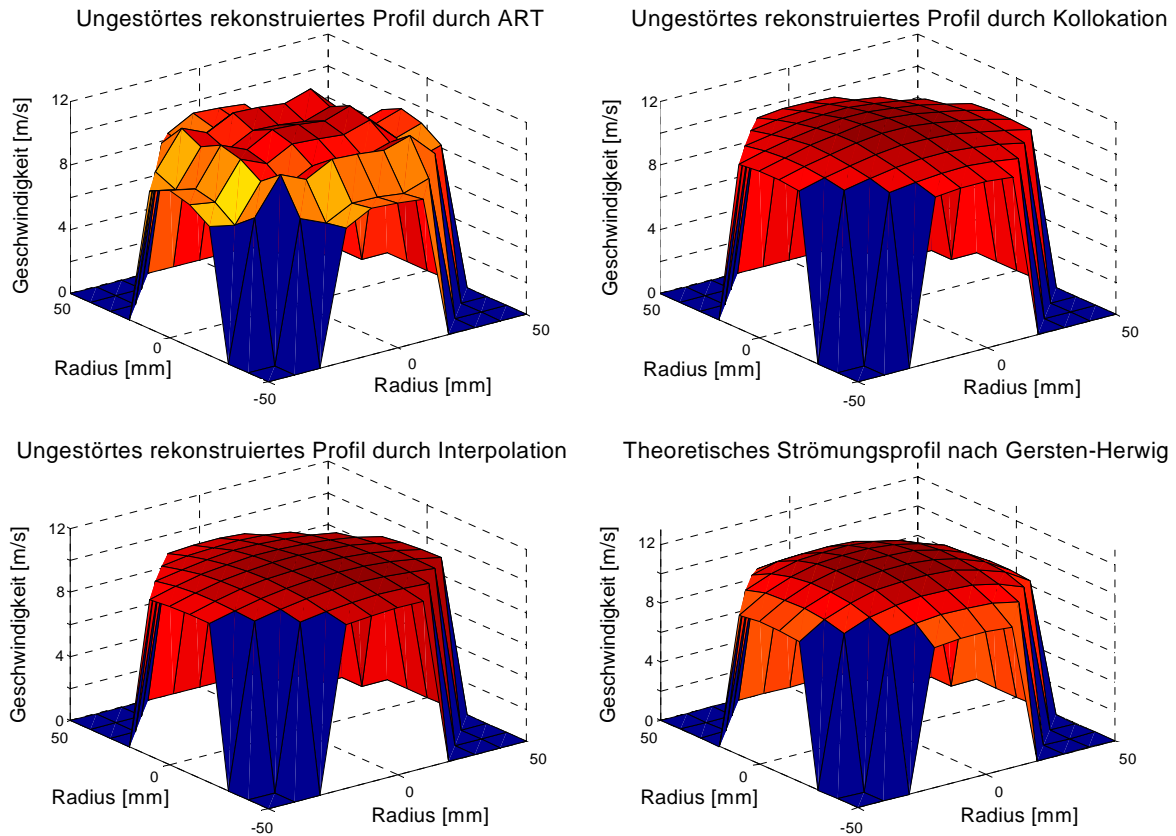


Bild 5.13: *Rekonstruktion des voll ausgebildeten Strömungsprofils.*

Die ART zeigt Schwierigkeiten auf, einen einheitlichen Übergang in der Abbildungsebene zu schaffen. Die Abweichungen bezogen auf die Referenz werden im nächsten Abschnitt aufgegriffen.

Beim gestörten Profil liefert die Kollokation keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die beiden anderen untersuchten Algorithmen lassen beim untersuchten Einfachkrümmer eine Tendenz der Geschwindigkeitsverteilung erkennen (Bild 5.14).

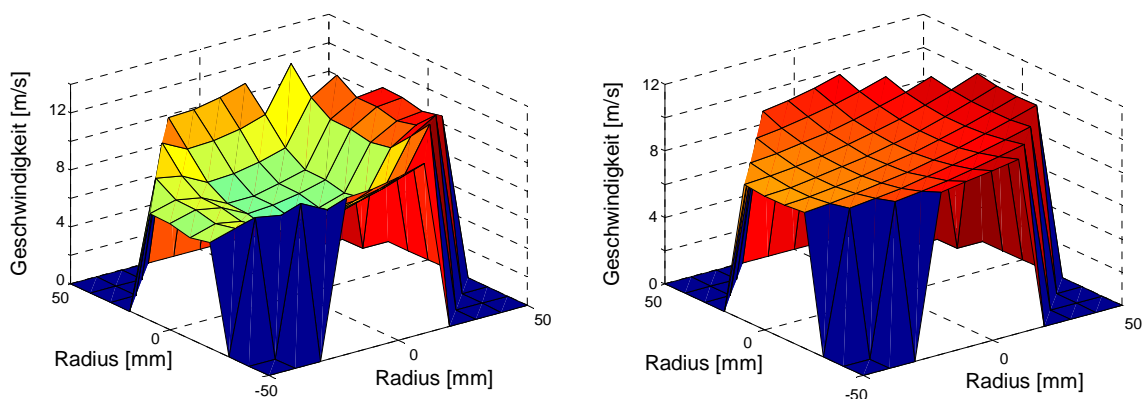


Bild 5.14: *Rekonstruktion des gestörten Strömungsprofils 1 D hinter einem Einfachkrümmer, ART (links) und Interpolation (rechts).*

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

Analog lassen sich die Aussagen auf den Raumkrümmer übertragen (Bild 5.15).

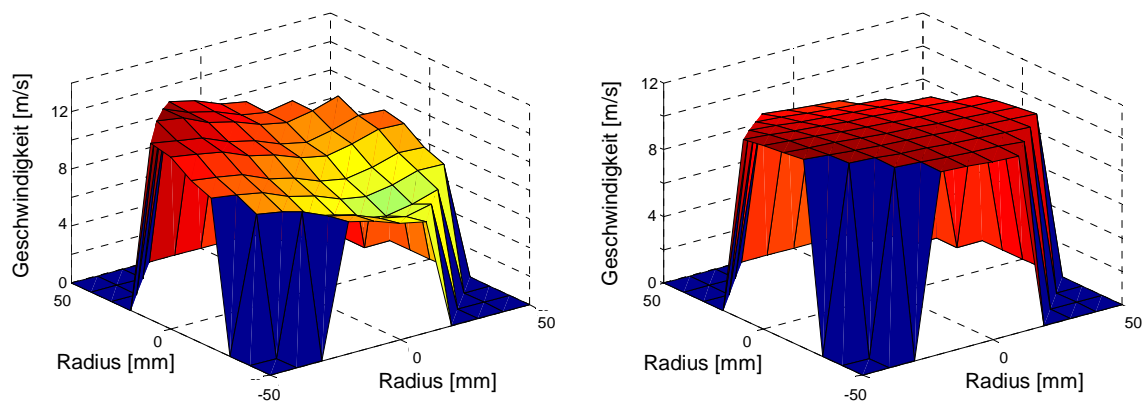


Bild 5.15: Rekonstruktion des gestörten Strömungsprofils 1 D hinter einem Raumkrümmer, ART (links) und Interpolation (rechts).

Im Vergleich zum Einfachkrümmer liegt das Maximum im gegenüberliegenden Randbereich, was auf den Dralleffekt in der Rohrströmung zurückzuführen ist. Die ART weist hinter dem Raumkrümmer ebenfalls wie in der Darstellung zuvor Extremwerte in der Verteilung auf. Die Interpolation beschränkt sich auch hinter dieser Störung auf die tendenzielle Darstellung der Geschwindigkeit.

Für einen Vergleich werden die einzelnen Pixel der jeweiligen Zeilen hintereinander aufgetragen (Bild 5.16). Ein Vergleich zwischen der Interpolation und der ART wird erst deutlich, wenn die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Numerierung der Bildelemente aufgeführt wird. Die Formgebung der ART ist vergleichbar mit den Darstellungen in der Literatur, jedoch sind die Extremwerte zu stark ausgeprägt. Die ART verarbeitet in der Rekonstruktion die Informationen, die zur Verfügung stehen. Die Interpolation kann als Mittelwert gedeutet werden, so dass nur die Tendenz der Geschwindigkeitszunahme im Randbereich erkennbar ist.

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

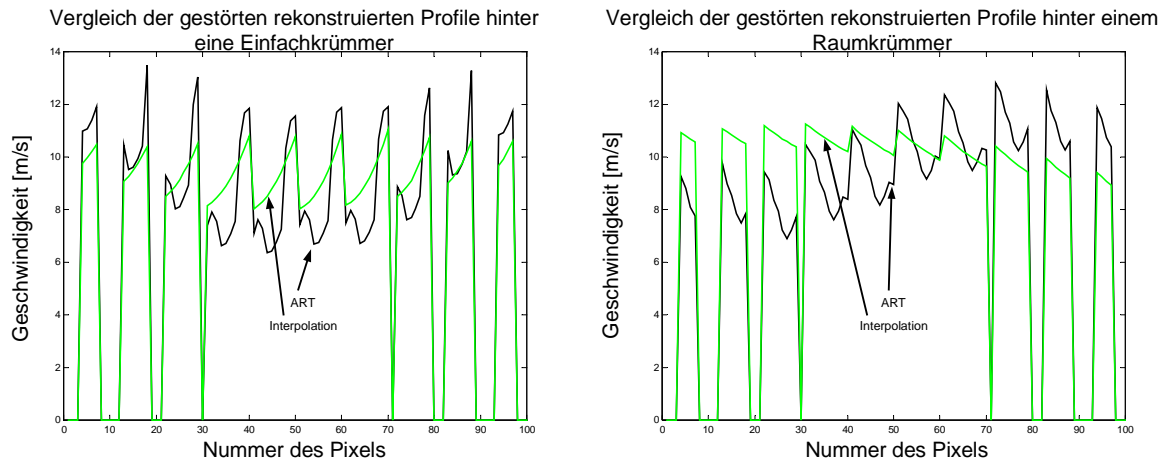


Bild 5.16: Darstellung der gestörten Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Numerierung der Bildelemente.

5.4.2 Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse

Die Ultraschalltomographie in der Rohrströmung ist mit wenigen Daten durchführbar, um grundsätzliche Störungen des Strömungsprofils zu erkennen. Dies äußert sich in der Darstellung der Ergebnisse. Durch die beschränkte Anzahl der Messpfade steht für die Tomographie nur ein geringer Informationsgehalt zur Verfügung. Durch den Vergleich verschiedener Rekonstruktionsalgorithmen erfolgen unterschiedliche Darstellungen. Die Vorteile der gewählten Ansätze sind ebenfalls unterschiedlich. Ein qualitativer Vergleich erfolgt bei einer voll ausgebildeten Rohrströmung in der folgenden Abbildung (Bild 5.17).

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

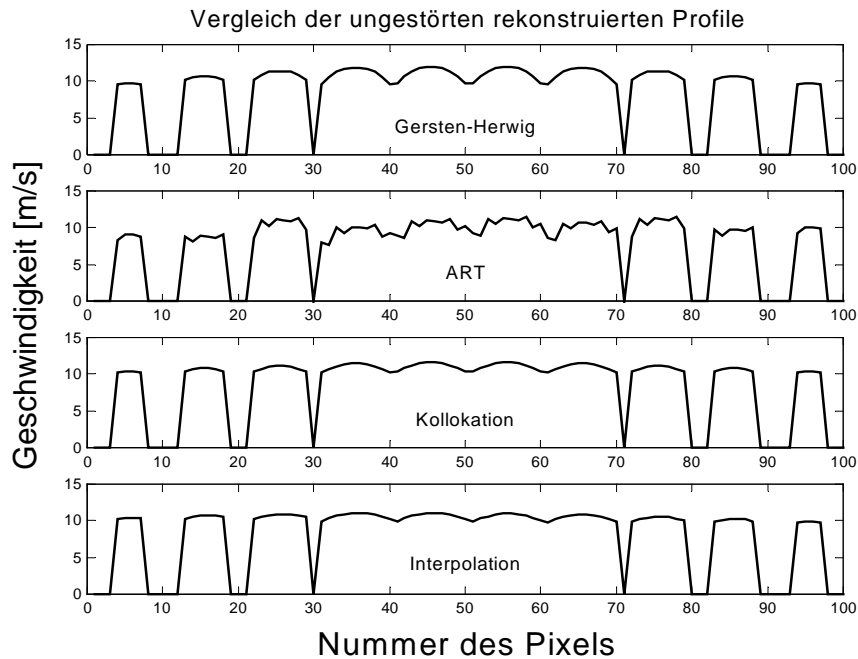


Bild 5.17: Vergleich der unterschiedlichen Algorithmen beim voll ausgebildeten Strömungsprofil.

Die Bezugsgröße entspricht dem theoretischen Ansatz in [13]. Anhand der Darstellungen in Bild 5.13 ist ersichtlich, welcher Algorithmus sich zur Rekonstruktion eines voll ausgebildeten Profils eignet. Das Verfahren mit den geringsten Messabweichungen liefert die Kollokation, die im Bereich von $\pm 10\%$ liegen. Das Problem der Rekonstruktion liegt in der Darstellung des Randbereiches. Zwar stehen in diesem Bereich Informationen zur Verfügung, die Ursache der Abweichung ist auf die grobe Aufteilung der Abbildungsebene zurückzuführen. Auffällig ist die Rekonstruktion der ART. Die uneinheitliche Darstellung liegt am vereinfachten Algorithmus, der gewählt wurde, da die Informationen direkt verarbeitet und nicht durch zusätzliche Koeffizienten geglättet werden.

Ein Vergleich der Rekonstruktionsalgorithmen hinter Störungen kann nur direkt untereinander erfolgen, da keine theoretische Näherungsgleichung vorliegt. Somit kann nichts Eindeutiges über die Reproduzierbarkeit der einzelnen Algorithmen gesagt werden. Jedoch sind die Tendenzen der Verschiebung des Strömungsprofils entsprechend den aus der Literatur bekannten deutlich erkennbar (Bild 5.14, 5.15).

5.5 Anpassung der Polynome

Eine Verbesserung der tomographischen Darstellung stellt eine Polynomangleichung dar. Für das ungestörte Profil liegt somit eine Funktion $f(x)$ zugrunde, die durch zugehörige Polynome verändert werden kann. Die als Referenz dienende theoretische Näherungsgleichung nach *Gersten-Herwig* [13] liefern die Referenzpolynome, die in der Rekonstruktion erreicht werden sollen. Das Ergebnis der Polynomangleichung ist in Bild 5.18 dargestellt.

Ein Vergleich mit Bild 5.17 weist eine deutliche Verbesserung durch die Polynomangleichung auf. Die relative Abweichung für Kollokation und Interpolation konnte auf $\pm 0,2\%$ reduziert werden. Die ART ist teilweise mit Abweichungen von über $\pm 4\%$ behaftet, was auf die ursprüngliche Rekonstruktion zurückzuführen ist, die nicht mehr einheitlich mittels Polynomangleichung geglättet werden kann.

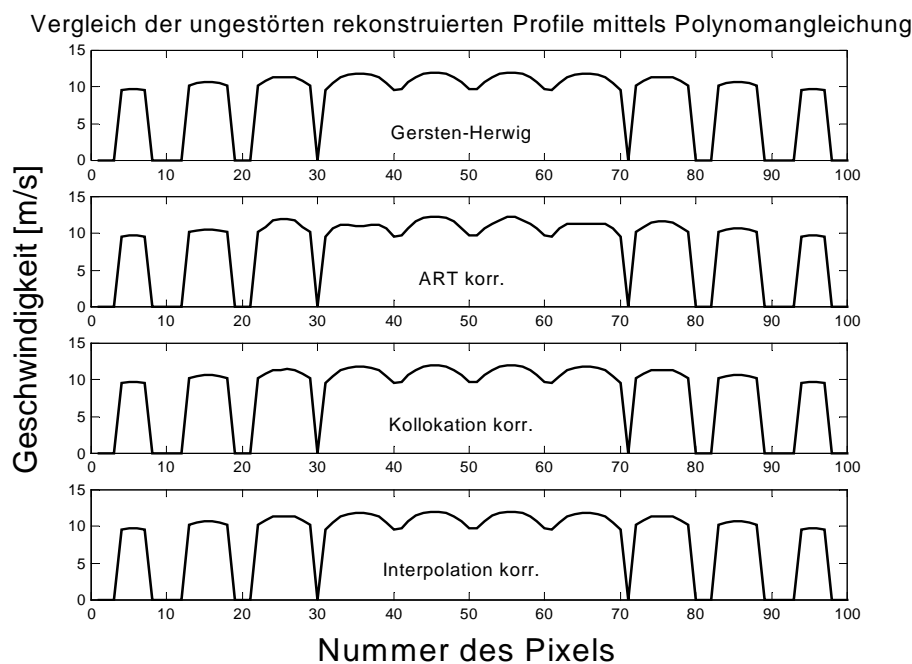


Bild 5.18: Vergleich der unterschiedlichen Algorithmen beim voll ausgebildeten Strömungsprofil mittels Polynomangleichung.

5.6 Weitere Störungsformen

Um weitere Störungen tomographisch darzustellen, wurden Profile hinter einer Halbblende und einem Störkörper untersucht. Die Rekonstruktion der Strömungsprofile entspricht den Erwartungen.

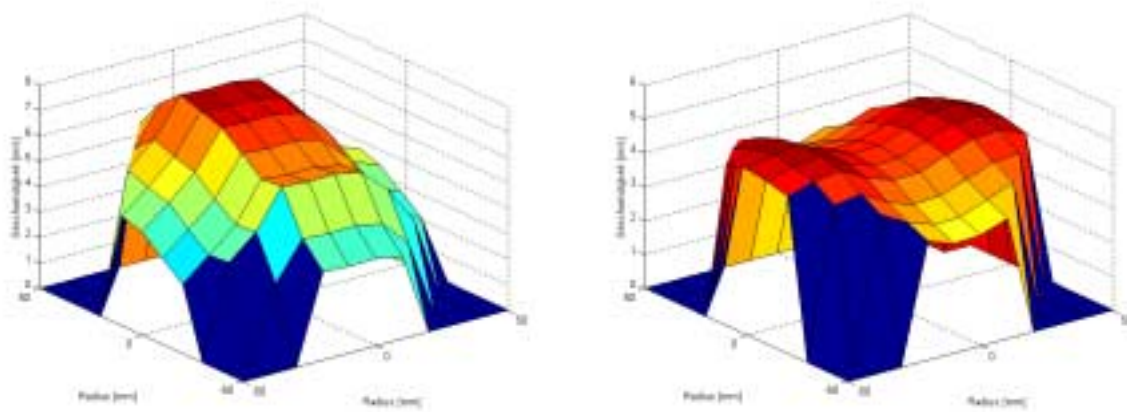


Bild 5.19: Darstellung des Strömungsprofils hinter einer Halbblende (links) bzw. hinter einem deltaförmigen Störkörper (rechts).

Die Profile wurden für eine mittlere Geschwindigkeit von $u_m = 4 \text{ m/s}$ rekonstruiert. Eine Erhöhung der Geschwindigkeiten führte zu Artefakten im Ergebnis aufgrund der intensiven Störung in der Strömung. Mittels Korrelation war eine Geschwindigkeitsbestimmung nicht möglich. Die ART zeigte für gestörte Profile die besten Ergebnisse auf, die auch in diesem Beispiel Anwendung fand.

5.7 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die versetzte Anordnung und durch die grobe Auflösung Informationen aus dem Randbereich gewonnen werden können und somit eine eindeutigere tomographische Darstellung erzeugt werden kann, unabhängig von der Störungsform. Nachteilig wirkt sich die Verfahrensweise durch die Drehung der Messkammer aus, so dass keine Echtzeitvisualisierung möglich ist. Der uneinheitliche bzw. scharfe Übergang zwischen den Bildelementen lässt sich durch eine Polynomangleichung glätten. Mit Hilfe der Korrelationstechnik lassen sich genügend Informationen sammeln, die eine akzeptable tomographische Darstellung liefern. Die Visualisierung der Rohrströmung ist durch relativ einfache Algorithmen

5 Die kreuzkorrelative Durchflussmessung

möglich. Die ART zeigt deutlich die beste Reproduzierbarkeit und ist somit zur Rekonstruktion jeglicher Strömungsprofile verwendbar.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Die Vortexmessung mittels Ultraschall weist in den Signalen höhere Empfindlichkeiten auf als vergleichbare Signale, die mittels Drucksensoren aufgenommen werden. Die Ultraschallschranke wird schon bei geringen Störungen in der Amplitude, ebenso wie in der Phase, moduliert. Die Modulation in Vortexmetern entspricht einer Überlagerung von Wirbeln und von stochastischen Einflüssen aufgrund natürlicher Gegebenheiten in der Strömung. Zur Gewinnung der in den Seitenbändern enthaltenen Informationen wird das Ultraschallsignal durch geeignete Verfahren demoduliert. Das bisher angewandte Demodulationsverfahren entspricht der digital-komplexen Bandpassabtastung bzw. dem rekonstruierten Phasenverlauf durch das erweiterte Kalmanfilter. Andere Techniken zur Demodulation der Amplitude und auch der Phase, insbesondere analoge Verfahren, werden in diesem Kapitel vorgestellt.

6.1 Theoretische Aspekte und Simulation

Die in der Strömung hinter einem Störkörper generierte periodische Wirbelablösung entspricht einem sinusförmigen Verlauf im Zeitbereich und einer eindeutigen Amplitude im Frequenzbereich. Das im Spektrum dargestellte Maximum entspricht der vorhandenen Frequenz. Ein Zusammenhang zwischen Wirbelfrequenz f_w und Strömungsgeschwindigkeit u_m ist über die Strouhal-Zahl Sr gegeben

$$Sr = \frac{d \cdot f_w}{u_m}, \quad (6.1)$$

wobei d die Breite des Störkörpers ist. Die Demodulation der Phase mittels komplexer Bandpassabtastung ist bedingt durch die 4-Quadranten inverse Tangensfunktion auf den Bereich $-\pi \leq \varphi \leq +\pi$ beschränkt. Dies hat zur Folge, dass Phasensprünge größer π durch den bisher angewandten Algorithmus korrigiert werden müssen. Eine Möglichkeit zur Rekonstruktion der Phase wurde in [26] entwickelt. Die Nullphasenlage des Signals ist von der Position der Ultraschallwandler in der Rohrwand abhängig. Liegt ein Offset vor und ist die Modulationsintensität so hoch, daß z.B. die obere Grenze des beschränkten

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Bereiches überschritten wird, bewirkt das herkömmliche Rekonstruktionsverfahren das Umklappen des Signalverlaufs an der unteren Grenze, wodurch ein Phasensprung erzeugt wird. Dies führt in der weiteren Auswertung zu fehlerhaften Ergebnissen. Die Erstellung einer Häufigkeitsverteilung der gemessenen Phasenwerte über den eingeschränkten Bereich führt zur Eliminierung des Offsetanteils. Die folgenden Abbildungen stellen zusammenfassend das bisher beschriebene Prinzip am Beispiel eines realen Signals dar.

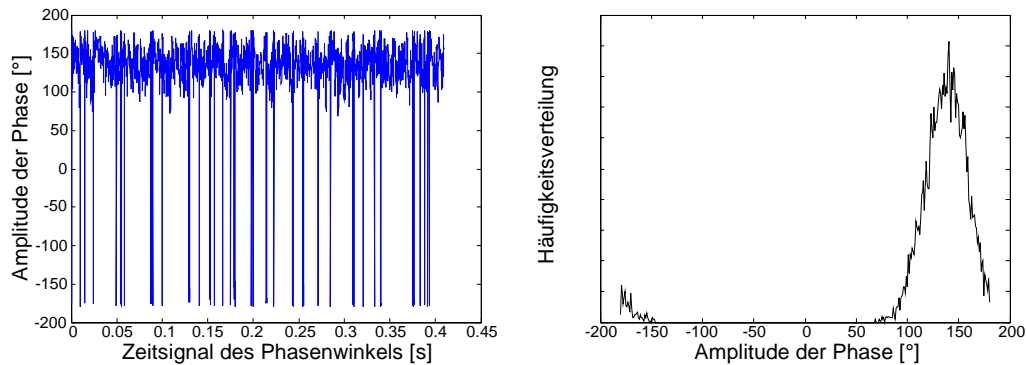


Bild 6.1: Bestimmung der Nullphasenlage.

In Bild 6.1 ist sowohl im Zeitsignal als auch in der Häufigkeitsverteilung eindeutig der Offsetanteil zu erkennen, der sich bei ca. 140° befindet. Beim Überschreiten der oberen Begrenzung bei dem Wert $\pi = 180^\circ$ werden die Phasenwerte durch den angewandten Algorithmus in den negativen Bereich abgebildet, was zu den bereits erwähnten unerwünschten Phasensprüngen führt. Die Korrektur der Nullphasenlage und damit die Eliminierung des Offsets hat zur Folge, dass das Signal keine Sprünge aufweist (Bild 6.2). Die Häufigkeitsverteilung wird im Maximum auf den Amplitudenwert Null verschoben.

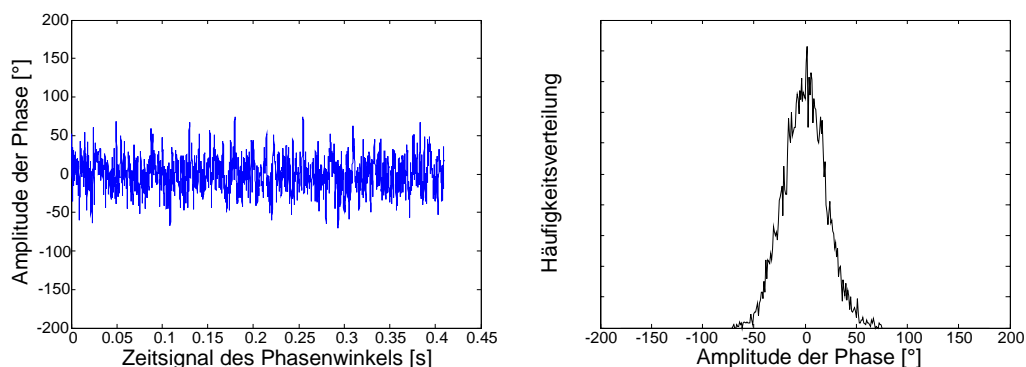


Bild 6.2: Korrektur der Nullphasenlage.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Der Verlauf des Signals ist nach der Korrektur stetig und ohne Verfälschungen durch Sprünge, so dass eine fehlerfreie Weiterverarbeitung des Signals ermöglicht wird. Die eigens für die Korrelationstechnik entwickelte Nullphasenkorrektur [26] findet ebenfalls in der Vortextechnik Anwendung. In der Vortexmessung ist eine derartige Signalaufbereitung unverzichtbar, was anhand einer Simulation verdeutlicht wird.

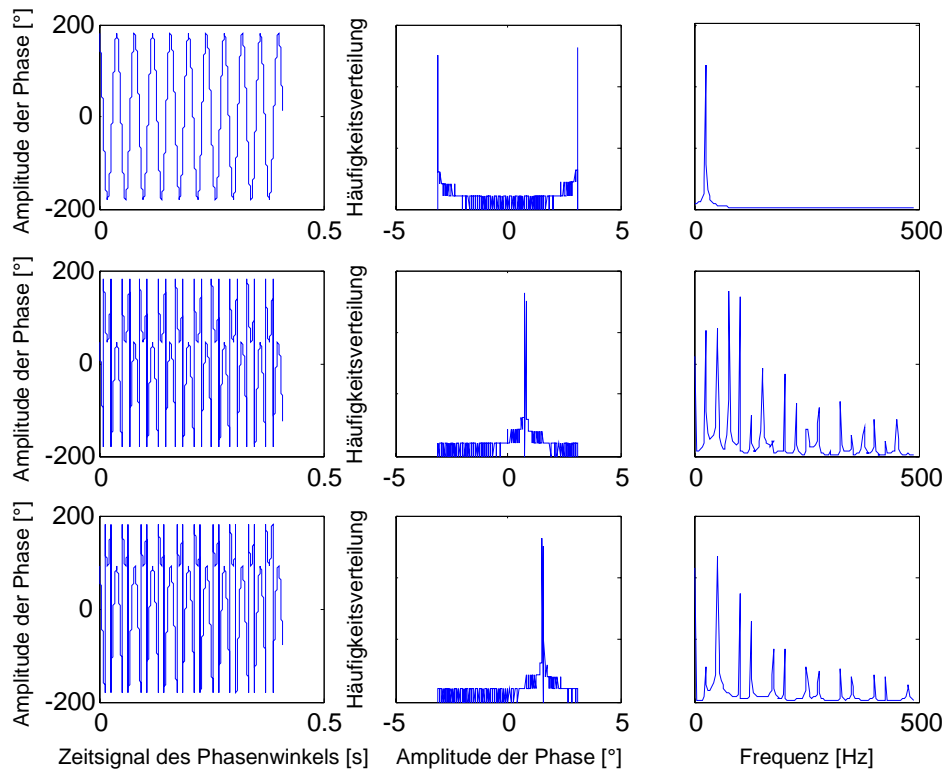


Bild 6.3: *Beeinflussung unterschiedlicher simulierter Nullphasenlagen bei der Frequenzbestimmung.*

Liegt die Phase innerhalb des Wertebereiches $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$, ist bei einem reinen Sinusverlauf auch die zugehörige Frequenz im Spektrum eindeutig erkennbar. Die Häufigkeitsverteilung der Amplitude eines sinusförmigen Signals wird durch einen muldenförmigen Verlauf charakterisiert. Liegt der Offsetanteil z.B. bei -0.75π (mittlere Reihe in Bild 6.3), so verschiebt sich der Verlauf der Häufigkeitsverteilung, und im Spektrum treten unterschiedliche Frequenzen auf, die den Oberwellen der Grundschwingung entsprechen. Die gesuchte Frequenz geht im Spektrum aufgrund der dominierenden Oberwellen unter. Die Bestimmung des Maximums führt zu einer Fehlinterpretation und ist somit als Messergebnis unbrauchbar. Um die richtige

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Frequenz auszuwerten, wird in der Häufigkeitsverteilung nicht das Maximum, sondern das Minimum gesucht und als Nullphasenlage bestimmt. Das Ergebnis sollte mit dem simulierten, in der oberen Reihe der vorherigen Abbildung, übereinstimmen.

In der Praxis wird dieser reine Sinusverlauf jedoch von Rauschen und vom Einfluss natürlicher Inhomogenitäten, die in der Strömung vorherrschen, überlagert. Diese Schmutzeffekte beeinflussen die tatsächlich zu detektierende Wirbelfrequenz, woraus niedrige Frequenzen im Spektrum dominieren, die das Ergebnis verfälschen. Dem Problem des Rauscheffektes kann mit einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis entgegengewirkt werden. Die Effekte in der Strömung sind physikalischer Natur und durch die hohe Empfindlichkeit der Ultraschallwandler nicht unterdrückbar. Diese Problematik wird im nächsten Abschnitt behandelt werden.

6.2 Gemessene Ultraschallsignale

Die Informationen über die charakteristischen Eigenschaft in Vortexmetern liegen in den komplex modulierten Ultraschallsignalen in unterschiedlichster Form vor, sowohl in der Amplitude als auch der Phase, die getrennt voneinander im Folgenden untersucht werden sollen. Um die Sachverhalte richtig zu verstehen werden folgende Definitionen eingeführt. Unter der Wirbelfrequenz ist die sich einseitig ablösende Wirbelfolge zu verstehen. Eine periodische Wirbelstraße ist durch eine alternierende beidseitige Wirbelablösung gekennzeichnet. Dieser Effekt schlägt sich in der Modulation als sog. Modulationsfrequenz nieder. Für die zwei folgenden Abschnitte wurde eine Gewindestange als Störkörper aufgrund der sauberen und eindeutigen Wirbelbildung ausgewählt. M12 repräsentiert die mittlere Grösse der in Abschnitt 6.5.2 untersuchten Gewindestangen von M3 bis M30.

6.2.1 Die demodulierte Amplitude

Die Auswertung dieser Modulationskomponente wurde ausschließlich in [37] angewandt. In der folgenden Abbildung ist beispielhaft ein demodulierter Zeitverlauf der Amplitude und das dazugehörige Spektrum, am Beispiel einer M12-Gewindestange als Störkörper bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s dargestellt.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

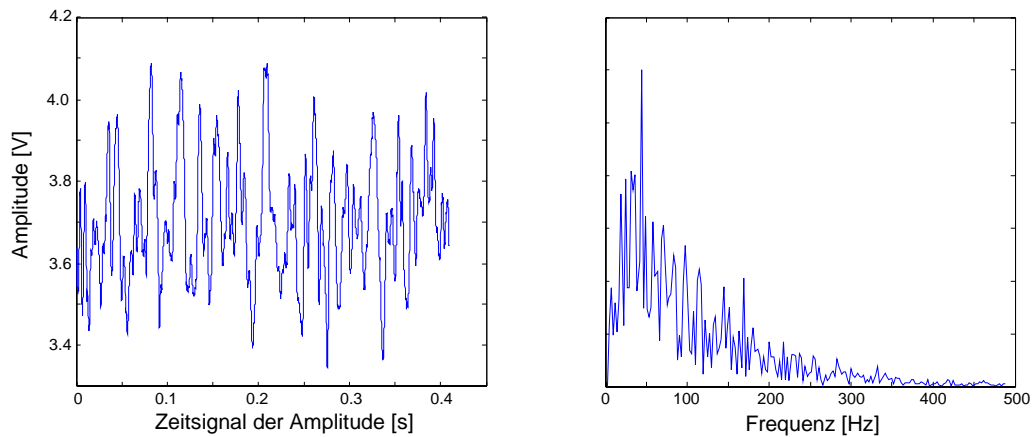


Bild 6.4: M12: Zeitverlauf und Spektrum der demodulierten Amplitude bei 2 m/s .

Ein eindeutiger sinusförmiger Verlauf ist aus dem Zeitsignal nicht zu entnehmen. Das Maximum lässt sich im Spektrum bei einer Frequenz von ca. 38 Hz wiederfinden, welches für diesen Anwendungsfall der tatsächlichen Wirbelfrequenz entspricht. Weitere Maxima sind bei niedrigeren Frequenzen erkennbar, die aufgrund von Turbulenzen in der Strömung detektiert werden. Die Modulationsfrequenz von 76 Hz ist zwar vorhanden, hat aber keinen bedeutenden Einfluss auf die Auswertung des Signals. Die Demodulation der Amplitude detektiert eindeutig die Wirbelfrequenz im Spektrum für niedrige Geschwindigkeiten. Bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit auf 25 m/s beschreibt die Rekonstruktion der demodulierten Amplitude folgenden Verlauf.

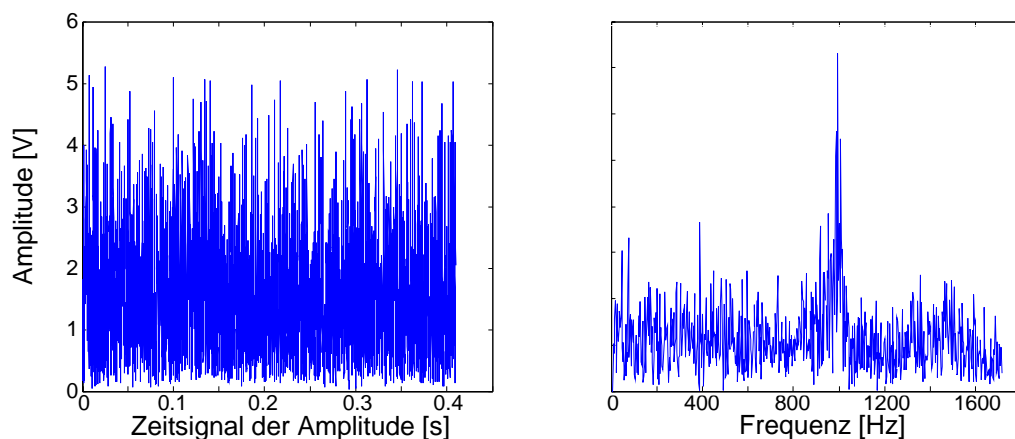


Bild 6.5: M12: Zeitverlauf und Spektrum der demodulierten Amplitude bei 25 m/s .

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Die Auswertung bei hohen Geschwindigkeiten zeigt ein Maximum im Spektrum bei der Modulationsfrequenz. Die sich an beiden Seiten des Störkörpers ablösenden Wirbelfolgen beeinflussen im wesentlichen das Ultraschallsignal. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Amplitude durch jeden einzelnen Wirbel moduliert wird. Bei dieser Geschwindigkeit und dem eingesetzten Störkörper beträgt die zugehörige Wirbelfrequenz ca. 475Hz . Diese Frequenz tritt im Spektrum auf, hat aber für die Auswertung keine Bedeutung. Das Maximum im Frequenzbereich liegt bei der Modulationsfrequenz.

Es wurden zwei Grenzfälle bei niedriger und hoher Strömungsgeschwindigkeit für einen bestimmten Störkörper aufgezeigt, die anhand der Demodulation der Amplitude zwar zu eindeutigen, aber nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führten. Die Auswertung der Amplitude ist ohne gewisse Vorkenntnisse der Störkörpercharakteristik nur beschränkt durchführbar.

6.2.2 Die demodulierte Phase

Die Auswertung der demodulierten Phase erfolgt am selben Signal wie im Abschnitt zuvor. Ergänzend wird die Häufigkeitsverteilung (siehe Abschnitt 6.1) dargestellt, wodurch Erläuterungsansätze für die im Spektrum erzeugten Frequenzen abgeleitet werden. Hierbei wurde bereits die Korrektur der Nullphasenlage berücksichtigt und durchgeführt. Der Signalverlauf der Phase in Bild 6.6 wurde mittels QAD demoduliert.

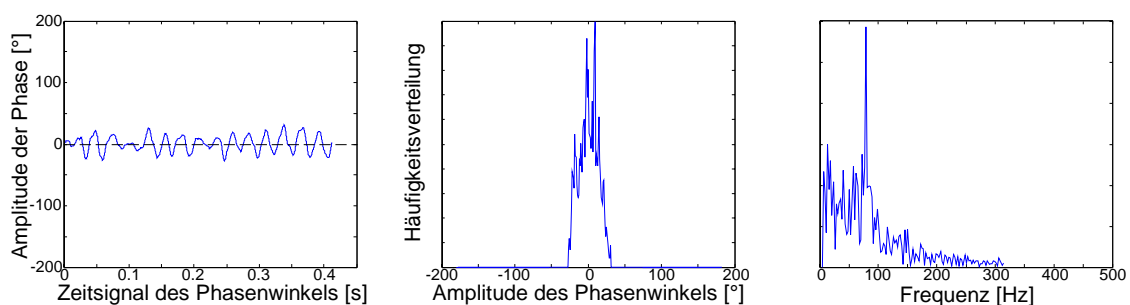


Bild 6.6: *M12: Zeitverlauf, Häufigkeitsverteilung und Spektrum der mittels QAD demodulierten Phase bei 2m/s .*

Der Zeitverlauf der Phase lässt eindeutig einen Sinus erkennen im Gegensatz zu dem vorhergehenden Zeitverlauf der Amplitude. Eine Korrektur der Nullphasenlage führt zum dargestellten Phasenverlauf, der innerhalb der Grenzen $\pm 180^\circ$ verläuft.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Eine Verfälschung des Ergebnisses durch Phasensprünge kann dadurch ausgeschlossen werden. Der Zeitverlauf lässt neben der Amplitude der Grundschiwingung auch die Amplitude einer Schwebung erkennen. Die Betrachtung des Spektrums bestätigt diese Aussage. Es dominiert die Modulationsfrequenz. Bei niedrigen Geschwindigkeiten moduliert jeder einzelne Wirbel die Phase. Zum Vergleich wird dasselbe Signal mittels Kalmanfilter demoduliert (Bild 6.7).

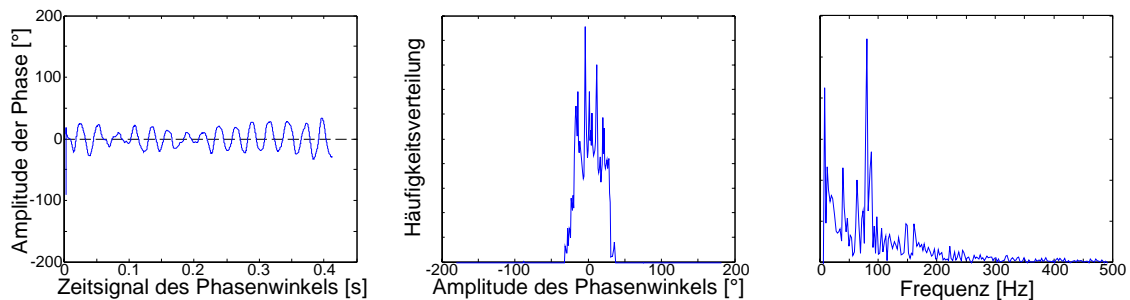


Bild 6.7: *M12: Zeitverlauf, Häufigkeitsverteilung und Spektrum der mittels Kalmanfilter demodulierten Phase bei 2 m/s .*

Die Modulationsfrequenz wird auch durch das Kalmanfilter eindeutig wiedergegeben. Es bestehen nur geringfügige Abweichungen zum Signalverlauf, der mittels QAD demoduliert wurde (vgl. Bild 6.6). Mit zunehmender Geschwindigkeit erhöht sich die Modulationsintensität im Phasenverlauf, was zur Folge hat, dass die Grenzen des definierten Gültigkeitsbereiches der Phasenrekonstruktion überschritten werden (Bild 6.8).

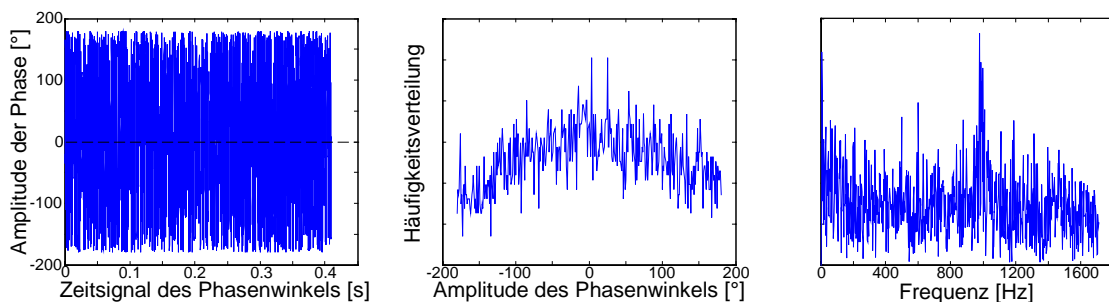


Bild 6.8: *M12: Zeitverlauf, Häufigkeitsverteilung und Spektrum der mittels QAD demodulierten Phase bei 25 m/s .*

Im Verlauf der abgeschnittenen rekonstruierten Phase ist eine Frequenz enthalten, die im Spektrum eindeutig als Modulationsfrequenz detektiert wird, so dass die

6 Die Vortex-Durchflussmessung

unvollständige Rekonstruktion keine Auswirkungen auf die Bestimmung der Frequenz hat. Nebenmaxima im unteren Frequenzbereich sind auf natürliche Turbulenzen in der Strömung zurückzuführen. Ein Vergleich zum demodulierten Signalverlauf mittels Kalmanfilter konnte nicht durchgeführt werden, da der rekonstruierte Phasenverlauf mit Phasensprüngen von bis zu $\pm 360^\circ$ versehen war, woraus ein abweichendes und damit nicht zu verwendendes Ergebnis resultierte. An dieser Stelle sind die Grenzen des Kalmanfilters erreicht worden, wodurch eine weitere Signalverarbeitung aufgrund zu hoher Modulationsintensitäten nicht durchführbar ist.

Hier konnte nachgewiesen werden, dass die Phase empfindlicher als die Amplitude auf Veränderungen in der Strömung reagiert und dadurch die Modulationsfrequenz dominiert. Die Maxima sind bei der Phasendemodulation ausgeprägter im Spektrum dargestellt, wodurch stabilere Ergebnisse erzielt werden können.

6.2.3 Die Modulationsintensität

Die Modulationsintensität ist in der Phasenmodulation von großer Bedeutung. Durch die komplexe Bandpassabtastung ist die Auswertung der Phaseninformation auf den Bereich $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ beschränkt. Die Modulationsintensität wird in Abhängigkeit vom verwendeten Störkörper und von der Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Beispielhaft soll dies anhand einer M5- und M30-Gewindestange für die Geschwindigkeiten 2 m/s und 25 m/s demonstriert werden.

Die Größe des Störkörpers macht sich im Phasenhub $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$ bemerkbar. Die M5-Gewindestange generiert einen Phasenhub von $\Delta\varphi = 24,4^\circ$ bei 2 m/s und $\Delta\varphi = 278,1^\circ$ bei 25 m/s (Bild 6.9). Der Einsatz eines größeren Störkörpers (M30-Gewindestange) beeinflusst schon bei 2 m/s die Phase mit einem Hub von $\Delta\varphi = 143,4^\circ$ (Bild 6.10).

6 Die Vortex-Durchflussmessung

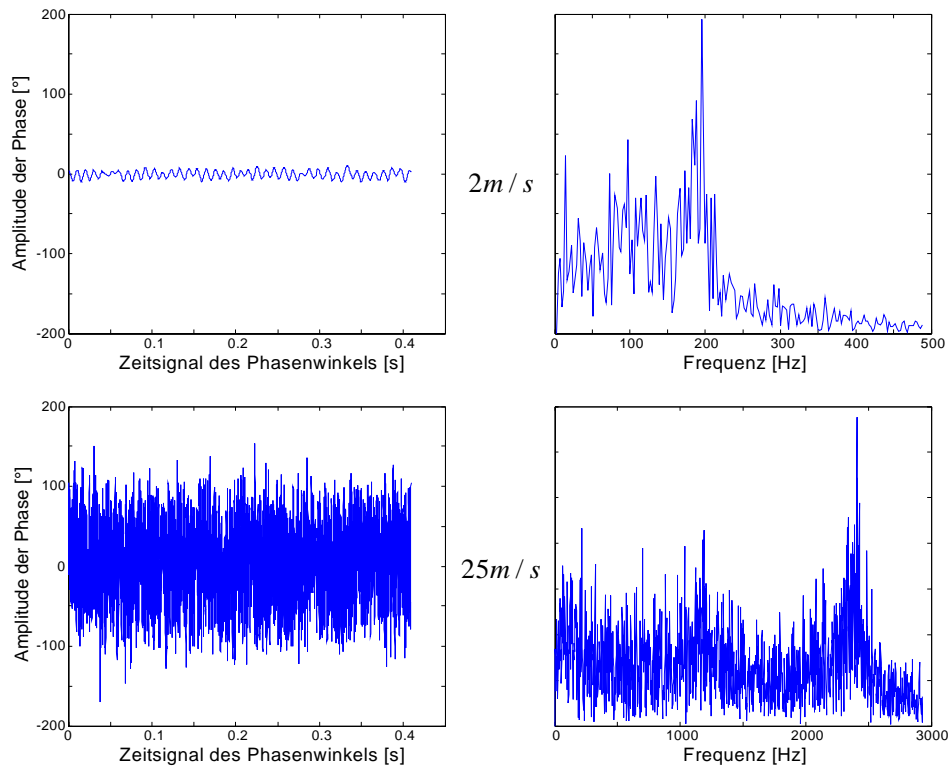


Bild 6.9: M5: Darstellung der Modulationsintensität für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten.

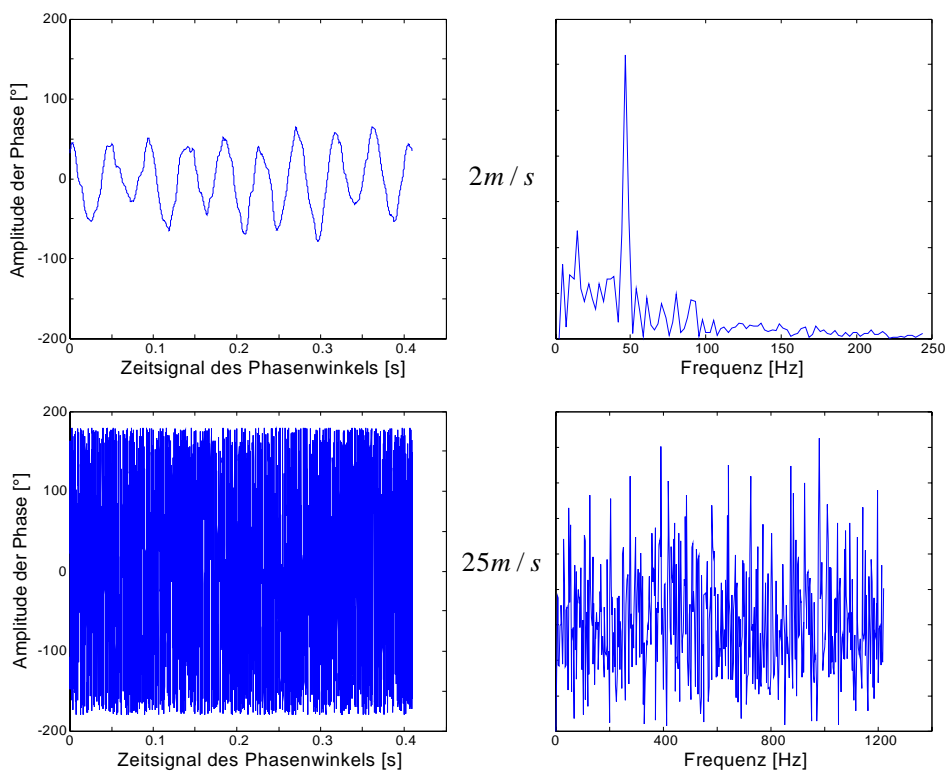


Bild 6.10: M30: Darstellung der Modulationsintensität für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Die Erhöhung der Geschwindigkeit auf 25 m/s zeigt das angesprochene Problem der Auswertung durch Überschreitung des begrenzten Bereiches auf (Bild 6.10). Der Phasenhub überschreitet deutlich den definierten Bereich, so dass eine Auswertung nicht mehr möglich ist. Das Spektrum in Bild 6.10 zeigt zufällige Frequenzen auf, die jedoch mit der gesuchten Wirbel- bzw. Modulationsfrequenz keine Gemeinsamkeit haben. Das Verfahren der Phasenauswertung durch QAD ist mit zunehmender Störkörpergröße und Strömungsgeschwindigkeit nicht geeignet. Ebenfalls versagt die Demodulation mittels Kalmanfilter bei zu hohen Modulationsintensitäten. Die Häufigkeitsverteilung stellt unter anderem ein Kriterium dar, wodurch Störkörper in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen auf Anwendbarkeit beurteilt werden können.

6.3 Analoge Demodulationsverfahren

Grundsätzlich erfolgte die Demodulation der Ultraschallsignale in digitaler Form (siehe Kapitel 4). Im letzten Abschnitt wurden die Grenzen aufgezeigt, dass durch die komplexe Bandpassabtastung die Auswertung der Phase eingeschränkt ist und bei hohen Modulationsintensitäten das Verfahren versagt. Eine weitere Alternative zur Demodulation komplex modulierter Signale liefern analoge Demodulatoren [18]. Analoge Demodulationsverfahren sind in der Nachrichtentechnik sehr weit verbreitet [23]. Die Kenntnisse der Demodulationsverfahren wurden auf die vorliegende Problemstellung übertragen. In der Nachrichtentechnik wird im Hochfrequenzbereich gearbeitet, wogegen der Arbeitsbereich der Ultraschall-Durchflussmessung im Niederfrequenzbereich liegt. Eine Unterteilung erfolgt in Verfahren zur Demodulation amplitudenmodulierter und winkel- bzw. phasenmodulierter Trägersignale.

6.3.1 Verfahren zur Demodulation amplitudenmodulierter Trägersignale

Prinzipiell wird dem Trägersignal ein Modulationssignal aufgeprägt, dessen Frequenz um ein Vielfaches niedriger ist. Das modulierte Ultraschallsignal schwankt im Idealfall periodisch in der Amplitude. Die daraus resultierende Amplitudenschwankung kann als Einhüllende dargestellt werden, die dem gesuchten Modulationssignal entspricht. Als analoge Verfahren wurden drei passive Hüllkurvendemodulatoren mit unterschiedlicher Beschaltung (Silizium-Doide 1N4148 (1), Schottky-Diode BAT46 (2), aktiver Filter (3)) entwickelt. Für weitere Informationen sei auf Fachliteratur [23]

6 Die Vortex-Durchflussmessung

verwiesen. Ein Vergleich der unterschiedlichen Beschaltungsformen führte zum Ergebnis, dass alle drei Hüllkurvendemodulatoren eine identische Charakteristik aufzeigten [9]. Somit wird für die weitere Betrachtung nur der analoge Demodulator (Nr. 1) repräsentativ für den Vergleich mit den digitalen Verfahren herangezogen.

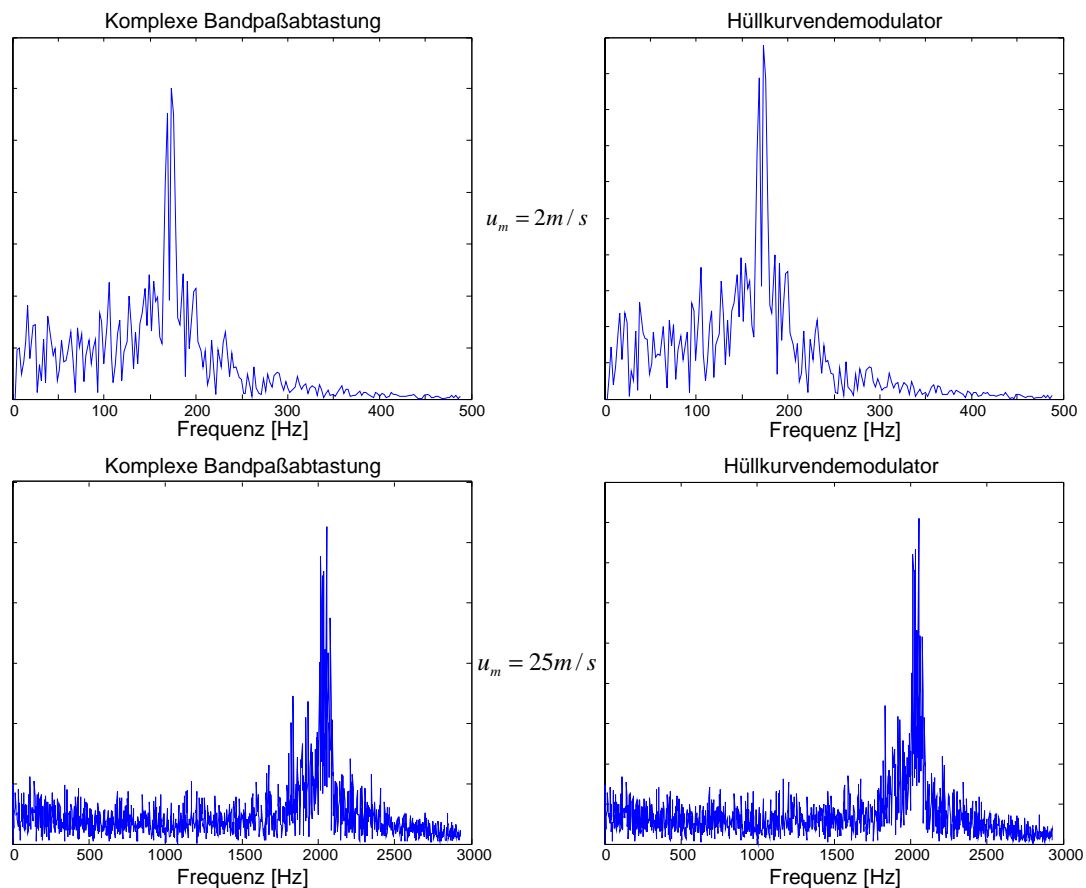


Bild 6.11: M3: Spektren der demodulierten Amplitude durch digitale und analoge Demodulation bei 2 m/s (obere Reihe) bzw. 25 m/s (untere Reihe).

Eine nähere Untersuchung erfolgt anhand der M3- und M30-Gewindestange für Geschwindigkeiten von 2 m/s bzw. 25 m/s . Beide Störkörper charakterisieren die möglichen extremen Abmessungen für die Vortextmessung. Der erste Vergleich der analogen Demodulation wird anhand der Amplitudendemodulation der komplexen Bandpassabtastung für die M3-Gewindestange bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Von der Charakteristik her zu urteilen, sind die Verfahren gleichwertig (Bild 6.11). Die Detektion des Maximums im Spektrum wie auch der Verlauf im Frequenzbereich stimmen überein. Es wird die Wirbelfrequenz, die sich im Spektrum sehr deutlich hervorhebt, erfasst. Die Demodulation eines

6 Die Vortex-Durchflussmessung

amplitudenmodulierten Ultraschallsignals hinter einer M3-Gewindestange liefert sowohl mit analogen als auch digitalen Verfahren sehr gute Ergebnisse.

Weitere Ergebnisse zur Beurteilung der Amplitudendemodulation erfolgen anhand der Untersuchung der M30-Gewindestange (Bild 6.12).

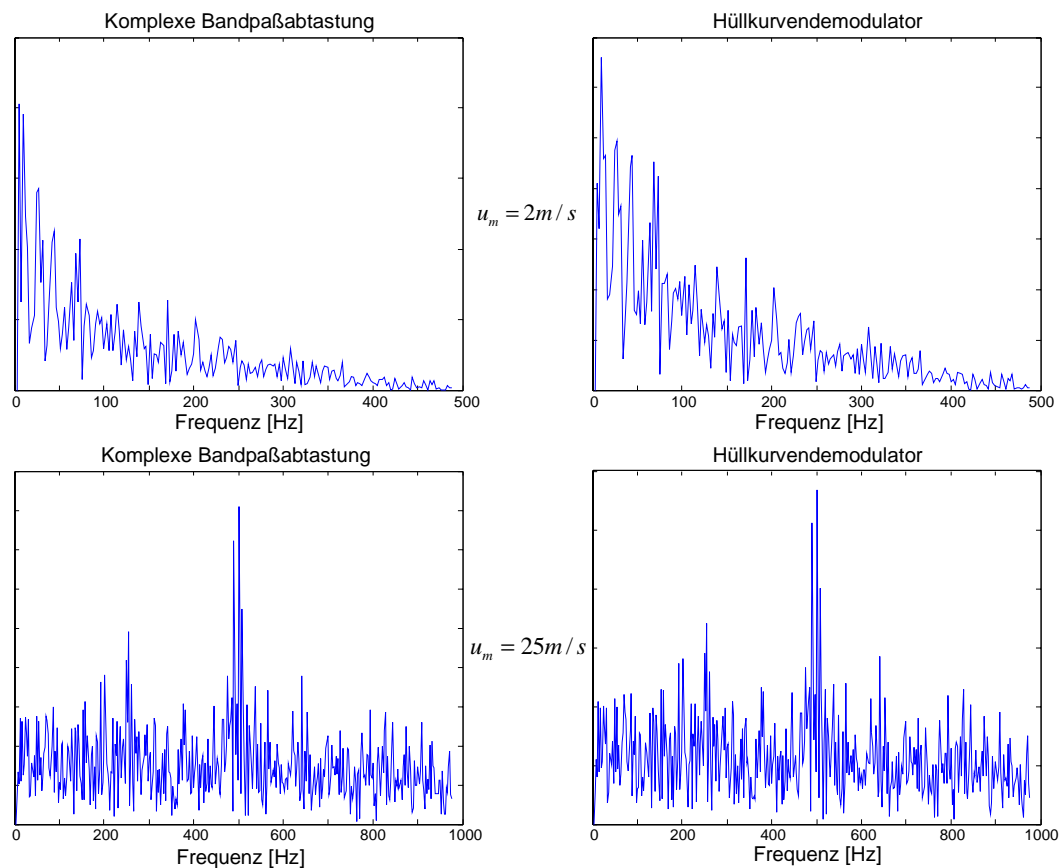


Bild 6.12: M30: Spektren der demodulierten Amplitude durch digitale und analoge Demodulation bei 2 m/s (obere Reihe) bzw. 25 m/s (untere Reihe).

Der überdimensionierte Störkörper generiert Wirbel, deren Frequenz eindeutig im Spektrum wiedergegeben werden. Bei niedrigen Geschwindigkeiten dominiert die Wirbelfrequenz. Der Ultraschall wird eindeutig von den sich ablösenden Wirbeln moduliert. Weitere Frequenzen, die im Signal vorkommen, entsprechen den Oberwellen der Grundschwingung. Durch eine Geschwindigkeitserhöhung steigt die Modulationsintensität an und die dominante Frequenz entspricht der Modulationsfrequenz. Durch die periodische Ablösung der Wirbel führen hohe Geschwindigkeiten zu einer Überlappung der Wirbel, woraus die doppelte Frequenz durch die Modulation der Wirbelpaare resultiert. Eine eindeutige

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Frequenzbestimmung ist bei diesem Störkörper nicht mehr möglich. Der Übergang zwischen der Detektion der Wirbel- bzw. der Modulationsfrequenz ist abhängig von der Modulationsintensität und somit von der Strömungsgeschwindigkeit.

Die Demodulation der Amplitude führt beim Einsatz kleiner Störkörper zu guten Ergebnissen im gesamten Geschwindigkeitsbereich. Mit Zunahme der Geometrie des Störkörpers dominiert in der Auswertung die Modulationsfrequenz mit steigender Geschwindigkeit. Dies zeigt, dass die Kenntnis über das charakteristische Verhalten des Störkörpers in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich für eine eindeutige Auswertung unumgänglich ist.

6.3.2 Verfahren zur Demodulation phasenmodulierter Trägersignale

Der Phasenwinkel des Trägersignals wird in Abhängigkeit vom Modulationssignal verändert. Dies macht sich im Zeitsignal dadurch bemerkbar, dass die einzelnen Schwingungen gestaucht bzw. gedehnt werden. Die Information des Modulationssignals eines phasenmodulierten Ultraschallsignals liegt in dem Momentanphasenwinkel. Die für die Phasenauswertung entwickelten analogen Verfahren bestehen aus vier diskret aufgebauten Demodulatoren (Flankendiskriminator, Gegentaktdiskriminator, Zähldiskriminator, Diskriminator mit phased-lock-loop (PLL)).

Eine ausführliche Erklärung zum besseren Verständnis der Funktionsweise der o.a. Demodulatoren ist aus [23] zu entnehmen.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

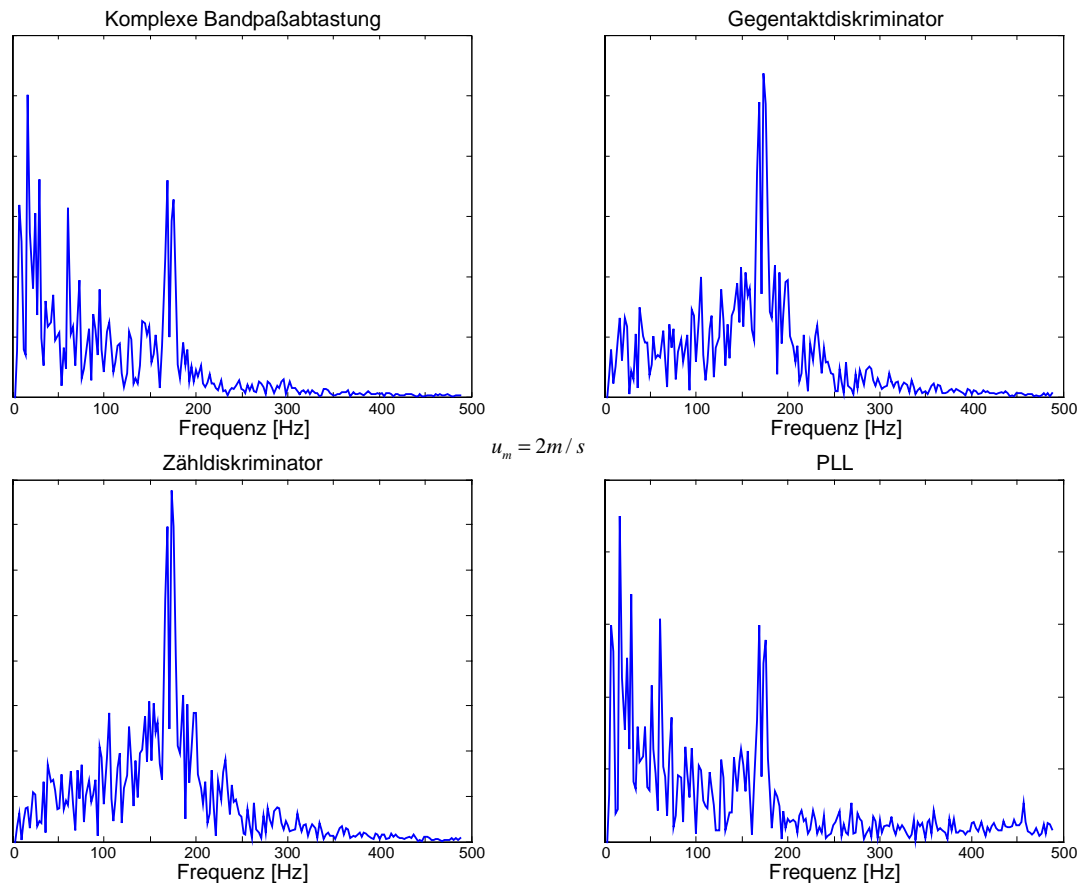


Bild 6.13: M3: Spektren der demodulierten Phase durch digitale und analoge Demodulation bei 2 m/s .

Die Aufnahme der Messreihen für die Amplitudendemodulatoren erfolgte zeitgleich für die Phasendemodulatoren. In Bild 6.13 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Phasendemodulatoren für eine M3-Gewindestange als Störkörper dargestellt. Aufgrund des konformen Signalverlaufs der komplexen Bandpassabtastung und des Flankendiskriminators wurde auf die Darstellung des Flankendiskriminators verzichtet. Einen ähnlichen Verlauf zeigt die PLL-Schaltung auf. Es dominieren stochastische Effekte und die Wirbelfrequenz wird nicht erkannt. Sehr gute Ergebnisse der Phasenauswertung liefert der Gegentaktdiskriminator. Die Wirbelfrequenz dominiert, niederfrequente Einflüsse werden unterdrückt. Die Erhöhung der Geschwindigkeit liefert für alle analogen Schaltungen sehr gute Ergebnisse. Im Falle der komplexen Bandpassabtastung dominieren niederfrequente Anteile im Signal die Bestimmung der Wirbelfrequenz (Bild 6.14).

6 Die Vortex-Durchflussmessung

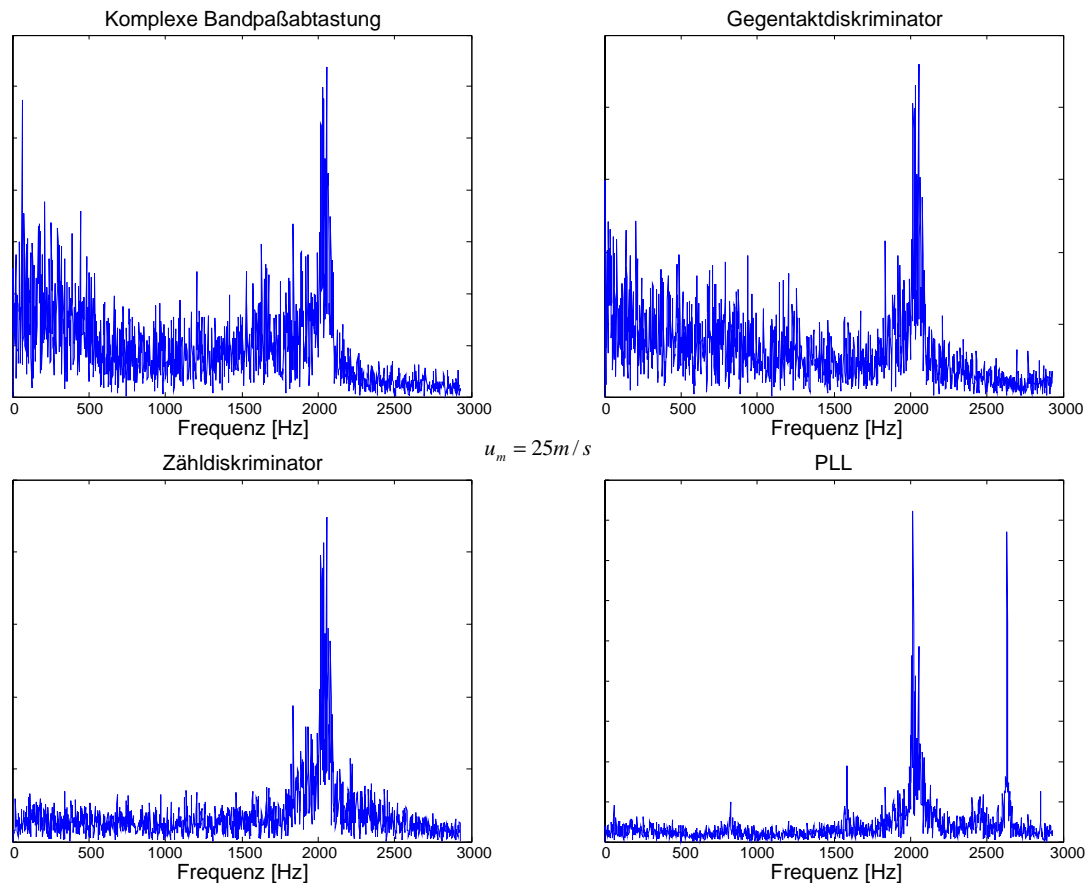


Bild 6.14: M3: Spektren der demodulierten Phase durch digitale und analoge Demodulation bei 25 m/s .

Um die Verwendungsmöglichkeit der analogen Schaltungen für unterschiedliche Störkörper zu überprüfen, wurden weitere Untersuchungen für eine M30-Gewindestange durchgeführt.

Bei niedrigen Geschwindigkeiten treten keine Probleme auf, die Wirbelfrequenz des Störkörpers eindeutig zu detektieren. Auffällig ist der Signalverlauf im Spektrum für den Gegentakt- bzw. Zähldiskriminator. Das Spektrum ist ähnlich dem Signalverlauf der demodulierten Amplitude des Hüllkurvendemodulators (vgl. Bild 6.11).

6 Die Vortex-Durchflussmessung

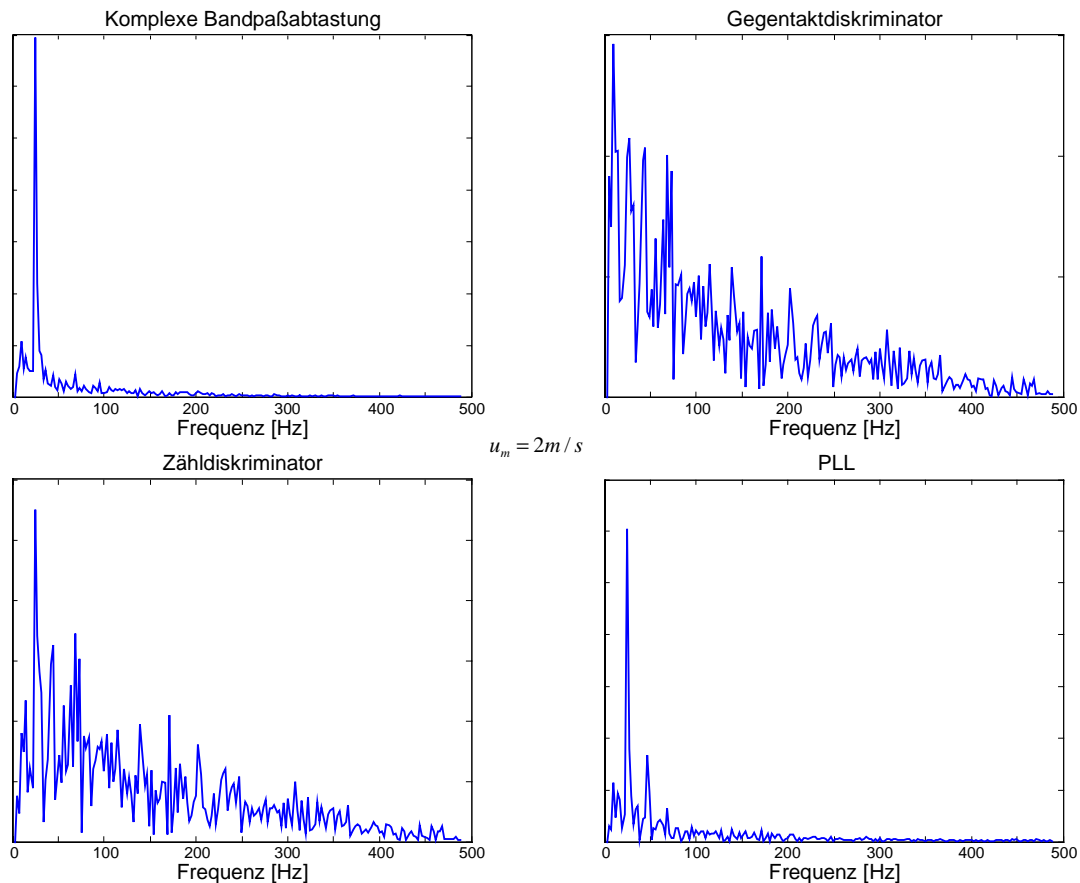


Bild 6.15: M30: Spektren der demodulierten Phase durch digitale und analoge Demodulation bei 2 m/s .

Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit nimmt bei diesen Störkörperdimensionen auch die Modulationsintensität zu, woraus bei der digitalen Demodulation aufgrund des Definitionsbereiches kein eindeutiges Ergebnis resultiert (Bild 6.16). Der Gegentaktdiskriminator zeigt sowohl die Wirbel- als auch die Modulationsfrequenz an. Welche dieser beiden Frequenzen dominiert, ist abhängig von der jeweiligen Beeinflussung der Wirbelbildung. Der Zähldiskriminator wertet die Modulationsfrequenz aus. Das Maximum, das durch die PLL-Schaltung dargestellt wird, trifft auf keine der gesuchten Frequenzen zu. Hohe Geschwindigkeiten bzw. Modulationsintensitäten können nicht eindeutig verarbeitet werden.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

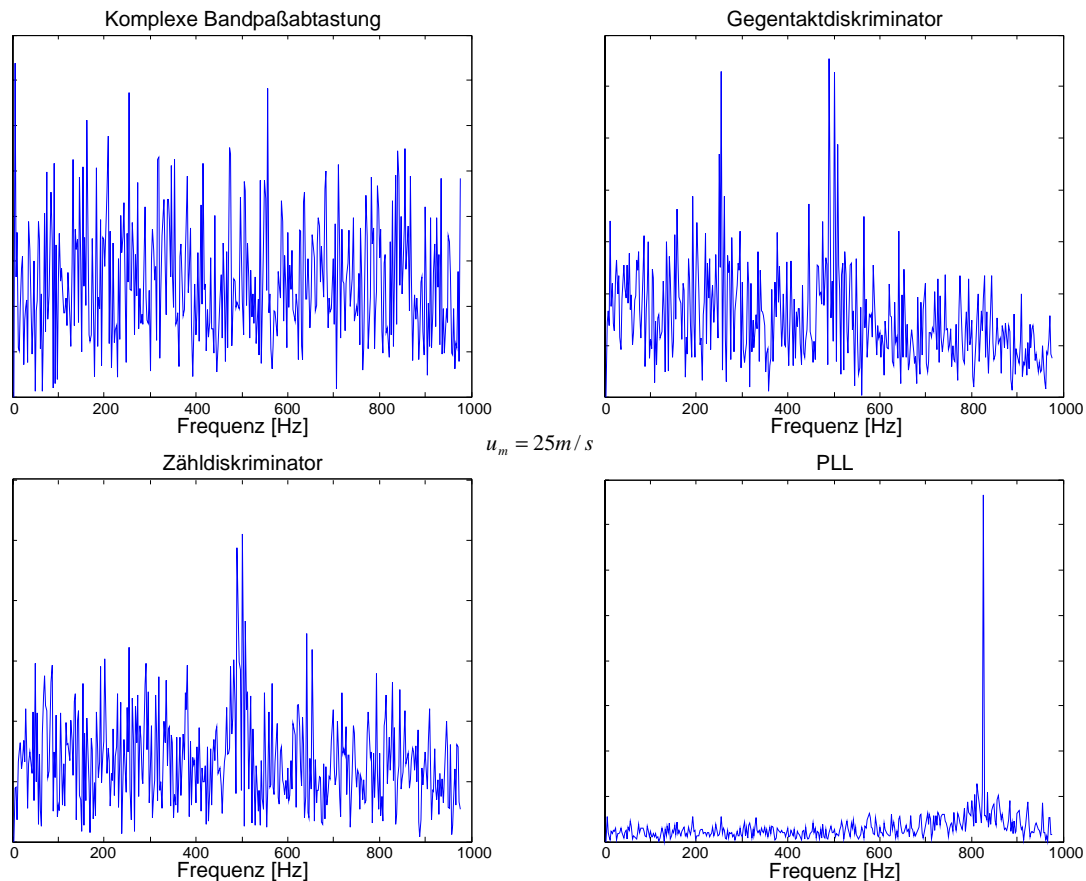


Bild 6.16: M30: Spektren der demodulierten Phase durch digitale und analoge Demodulation bei 25 m/s .

Auch die Demodulation der Phase führt beim Einsatz kleiner Störkörper im gesamten Geschwindigkeitsbereich zu guten Ergebnissen, wobei die digitale Demodulation im niedrigen Geschwindigkeitsbereich versagt. Große Störkörper generieren nur im niedrigen Geschwindigkeitsbereich eindeutige Signale. Für hohe Geschwindigkeiten ist aufgrund der hohen Modulationsintensität eine Auswertung für viele Demodulationsverfahren nicht möglich.

6.3.3 Vergleich der analogen und digitalen Demodulationsverfahren

Die Auswertung der Amplitude lieferte bei kleinen Störkörpern die exakte Wirbelfrequenz im gesamten Geschwindigkeitsbereich bei Verwendung analoger bzw. digitaler Demodulationstechniken. Kleine Störkörper sind insofern vorteilhaft, dass, bedingt durch die Geometrie, der Druckverlust niedrig gehalten werden kann. Große Störkörper generieren große Wirbel, die sich im Signal mit der Modulationsfrequenz niederschlagen. Effekte dieser Art können nur dann bei der

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Auswertung berücksichtigt werden, wenn die Charakteristik jedes einzelnen Störkörpers bekannt ist.

Die Auswertung der Phase führt nur bei der digitalen QAD, bei Verwendung kleiner Störkörper, zu Messabweichungen. Stochastische Effekte in der Strömung dominieren die eigentliche Wirbelfrequenz. Die Beeinflussung der Turbulenzen kann durch analoge Schaltungen reduziert werden. Die Verwendung großer Störkörper führt bei niedrigen Geschwindigkeiten zu eindeutigen Ergebnissen. Die Auswertung versagt jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit aufgrund der hohen vorherrschenden Modulationsintensität, die nicht mehr eindeutig aufgelöst werden kann (s. Kapitel 6.5).

Die Ergebnisse zeigen, dass mit der analogen Demodulation eine bessere Auswertung erzielt werden kann. Im Hinblick auf die Kostenfrage stellt die analoge Technik eine günstige Alternative zur digitalen Technik dar. Diesem Vorteil widerspricht die Vielzahl an Bauteilen in der Schaltung, wodurch jedes einzelne mit einem Bauteilrauschen bzw. mit Abweichungen behaftet ist und sich somit eine höhere Meßunsicherheit ergibt. Die digitale Demodulation ist einfacher zu realisieren, jedoch sind Signale mit einem hohen Signal-Rausch-Abstand erforderlich.

Die Wahl der Technik ist davon abhängig, in welcher Form das demodulierte Signal zur Weiterverarbeitung im Gesamtprozess benötigt wird. Die analoge Demodulation der Amplitude ist für die Wirbelfrequenzmessung sehr gut geeignet, da es sich in erster Linie um die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit handelt. Zudem ist diese Applikation als unabhängige Einheit in einem Prozess einsetzbar.

6.4 Unterschiedliche Trägerfrequenzen

Bisherige Untersuchungen zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgten sowohl in der Korrelations- als auch in der Vortextechnik, bei einer Trägerfrequenz von 220kHz [36,37] mit einer Bandbreite des Ultraschallwandlers $2,5\text{kHz}$ bei einer Nennfrequenz von 220kHz [25]. Weitere Untersuchungen erfolgten mit Ultraschallwandlern mit Nennfrequenzen von 80kHz mit einer Bandbreite von 3kHz [24] und 160kHz -Wandler über die keine weiteren Informationen vorlagen, wie z.B.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

die Bandbreite. Die Aufnahme der Frequenzgänge der jeweiligen Wandlertypen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

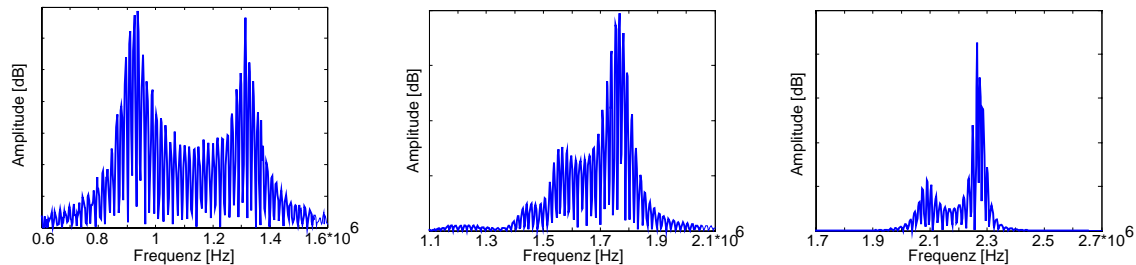


Bild 6.17: Frequenzgänge der verwendeten Ultraschallwandler.

Durch unterschiedliche Sende- und Empfangscharakteristiken der Wandler werden diese nicht mit der Resonanzfrequenz betrieben. Die angesteuerten Trägerfrequenzen entsprechen den vom Hersteller empfohlenen Nennfrequenzen von 80kHz , 160kHz und 220kHz (Bild 6.17, Frequenzgänge der Wandler von links nach rechts). Ein nicht im Resonanzbetrieb arbeitender Ultraschallwandler nutzt nicht die optimale Leistungsumsetzung des Systems aus. Leistungseinbußen aufgrund dieser Tatsache waren bei der Auswertung nicht zu verzeichnen.

Es stellt sich die Frage, inwiefern das Ergebnis durch die Veränderung der Trägerfrequenz beeinflusst wird. Einen Aufschluss gibt die Auswertung für folgende untersuchte Gewindestangen: M4, M10 und M20. Die Demodulation der Signale erfolgte in digitaler Form.

6.4.1 Die demodulierte Amplitude

Die beispielhafte Betrachtung der Geschwindigkeiten 2m/s und 25m/s sollen einen Einblick für den gesamten Geschwindigkeitsbereich darstellen. Für niedrige Geschwindigkeiten stellt das Ergebnis die Amplitudenauswertung (Bild 6.18) dar. Das Ultraschallsignal wird durch eine M4-Gewindestange bei einem Träger von 80kHz durch niederfrequente Anteile dominant beeinflusst.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

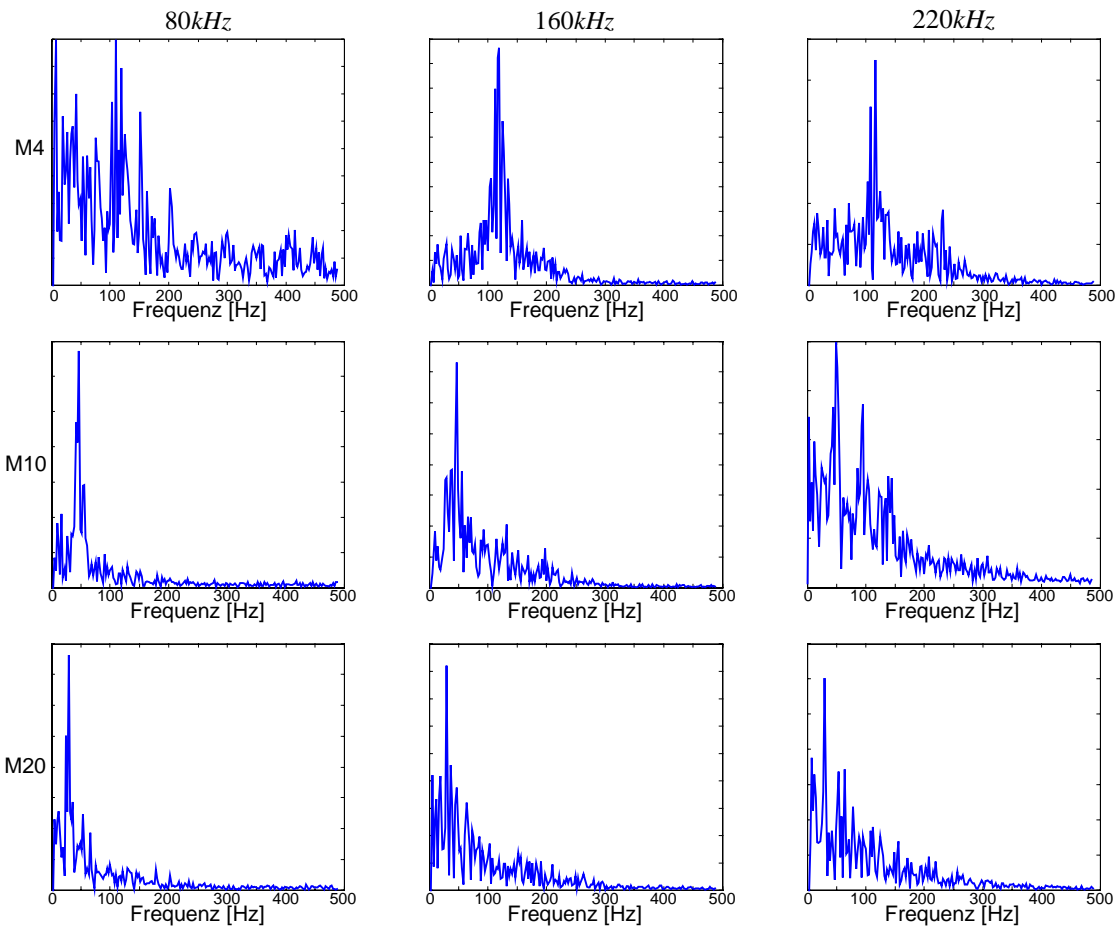


Bild 6.18: Auswertung der Amplitude für unterschiedliche Trägerfrequenzen und für verschiedene Gewindestangen bei 2 m/s .

Eine physikalische Erklärung für diese Effekte stellt die Wellenlänge des Trägers dar. Mit zunehmender Trägerfrequenz verringert sich dessen Wellenlänge. Liegen Modulationseffekte in der Strömung vor, die kleiner sind als die Wellenlänge des Trägers, treten diese im Signal nicht in Erscheinung. Die periodische Wirbelfolge einer M4-Gewindestange weist eine Wellenlänge von $\lambda = 16,7\text{ mm}$ auf. Die niedrigste Trägerfrequenz von 80 kHz entspricht einer Wellenlänge von ca. $\lambda = 4,3\text{ mm}$. Somit werden die Wirbel im Signal erkannt. Dennoch wird das Signal primär durch Turbulenzen in der Strömung beeinflusst, dadurch dominieren im Spektrum niederfrequente stochastische Anteile. Die nächste Abbildung stellt die Ergebnisse für höhere Geschwindigkeiten dar.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

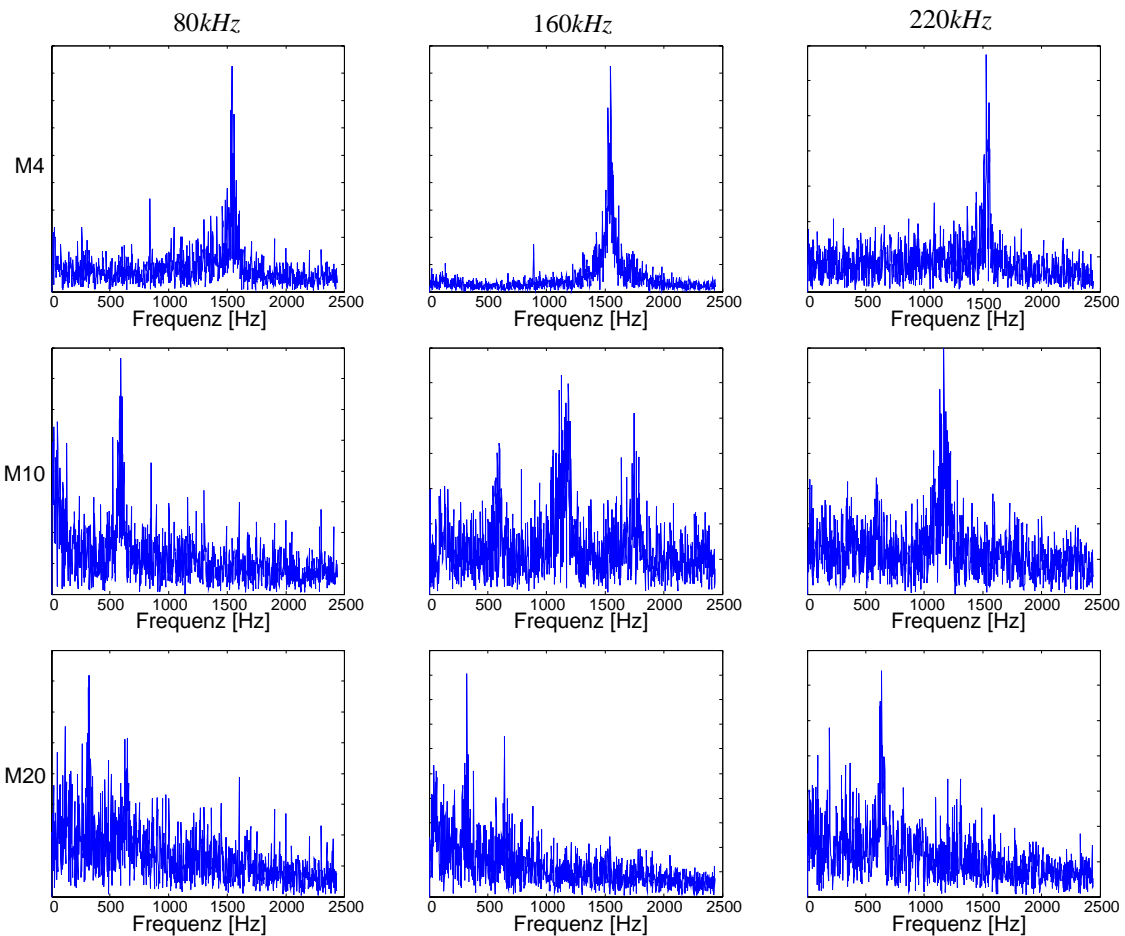


Bild 6.19: Auswertung der Amplitude für unterschiedliche Trägerfrequenzen und für verschiedene Gewindestangen bei 25m/s.

Eine Geschwindigkeitserhöhung zeigt auf, dass eine kleinere Trägerfrequenz mit zunehmender Störkörpergeometrie eindeutiger die Wirbelfrequenz auflöst. Die Wirbel lösen sich langsamer ab als bei kleinen Störkörpergeometrien. Mit größer werdender Trägerfrequenz dominiert die Modulationsfrequenz. Das Trägersignal detektiert die Wirbelpaare, woraus die zweifache Wirbelfrequenz resultiert. Weitere Erkenntnisse soll die Untersuchung der demodulierten Phase bringen.

6.4.2 Die demodulierte Phase

Die demodulierte Phase ist nur im Bereich zwischen $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ definiert. Auf die Darstellung der Häufigkeitsverteilung wird im Folgenden verzichtet. Die Phasenauswertung (Bild 6.20) zeigt für niedrige Geschwindigkeiten für die M4-Gewindestange vergleichbare Verläufe im Spektrum, wie bei allen drei Trägerfrequenzen zur Amplitudenauswertung (Bild 6.18). Der Vorteil der

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Phaseninformation wird in dieser Abbildung deutlich, die demodulierten Signale werden im Vergleich zur Amplitudenmodulation vom Rauschen weit weniger beeinflusst, und dadurch wird eine eindeutige dominante Frequenz detektiert.

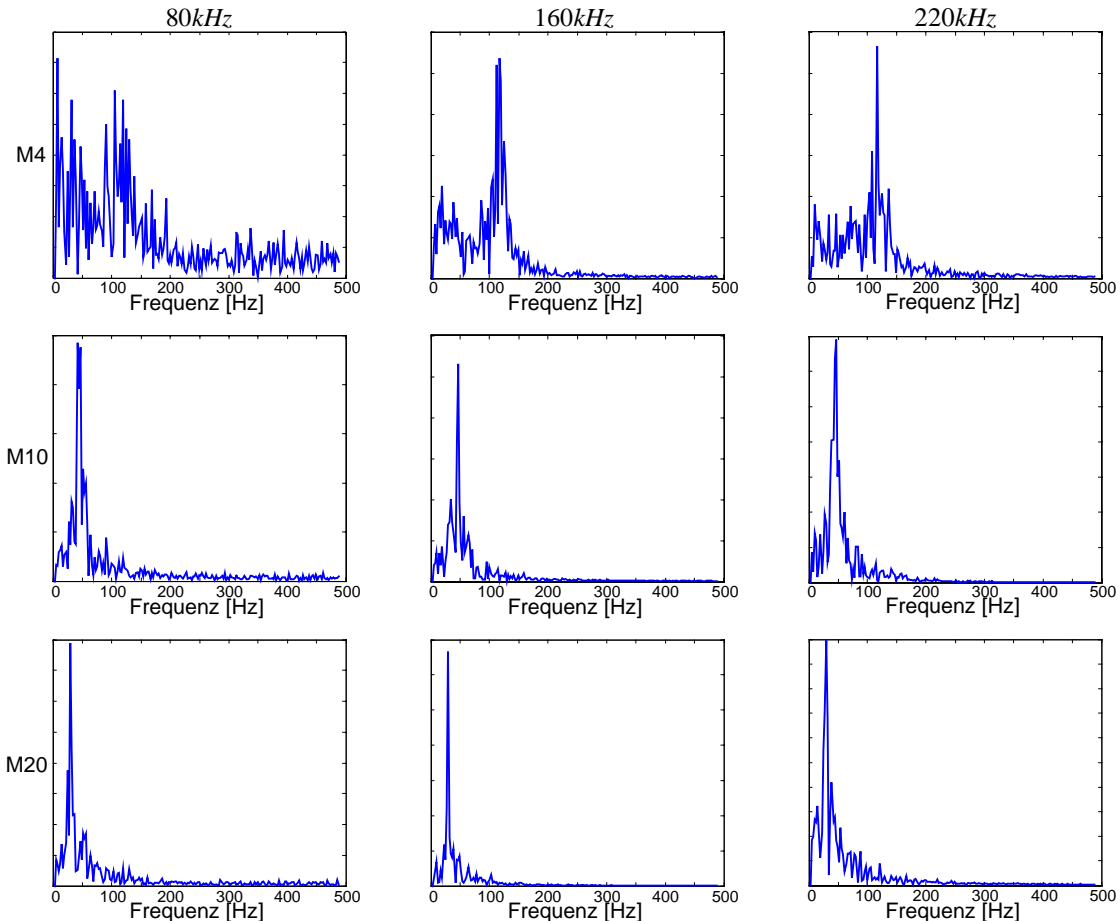


Bild 6.20: Auswertung der Phase für unterschiedliche Trägerfrequenzen und für verschiedene Gewindestangen bei $2m/s$.

Die Erhöhung der Geschwindigkeit auf $25m/s$ weist bei der Phasenauswertung (Bild 6.21) Probleme für hohe Trägerfrequenzen auf. Der Grund hierfür ist der beschränkte Bereich der Phasenrekonstruktion. Auch an diesem Beispiel wird deutlich, dass mit zunehmender Störkörpergeometrie die Trägerfrequenz reduziert werden muss. Trotz der Überschreitung des definierten Bereiches sind für hohe Modulationsintensitäten sehr gute Ergebnisse mit niedrigen Trägerfrequenzen zu erzielen. Dem Signal wird eine eindeutige Modulation durch die Wirbelfrequenz aufgeprägt. Mit dem bisher verwendeten Träger von $220kHz$ ist keine Auswertung der Vortextechnik bei überdimensionalen Störkörpern möglich. Trägerfrequenz und Störkörperabmessungen müssen aufeinander abgestimmt sein.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

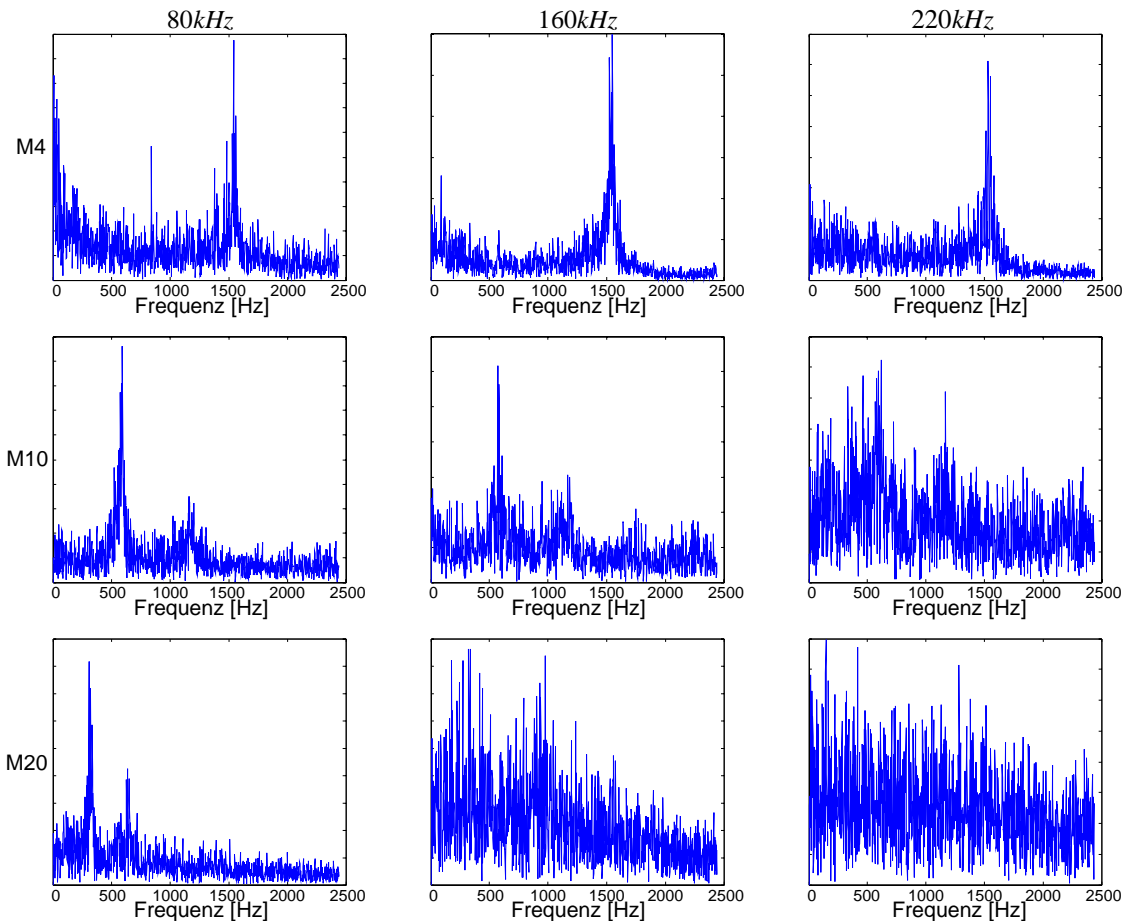


Bild 6.21: Auswertung der Amplitude für unterschiedliche Trägerfrequenzen und für verschiedene Gewindestangen bei 25m / s .

Fazit:

- Hohe Trägerfrequenzen sind für kleine Störkörpergeometrien und niedrige Trägerfrequenzen für große Störkörpergeometrien notwendig.
- Niedrige Trägerfrequenzen werden eindeutiger von der Wirbelfrequenz moduliert, bei hohen Trägerfrequenzen dominiert die Modulationsfrequenz.
- Die Phaseninformation ist rauscharm und deshalb der Amplitudeninformation vorzuziehen.

6.5 Unterschiedliche Störkörpergeometrien

In den nächsten Abschnitten erfolgt eine systematische Untersuchung von verschiedenen Störkörperformen, die sich auf den Delta-Störkörper, die Gewindestange und das T-Profil beschränken.

6.5.1 Der Delta-Störkörper

Als Störkörper wurden 7 Delta-Störkörper mit einem Breite-/Höheverhältnis von 2 untersucht. Die Abmessungen der einem Dreieck entsprechenden Störkörpergeometrie sind tabellarisch aufgeführt.

Tab. 6.1: Numerierung der verwendeten Delta-Störkörper.

Störkörper [Nr.]	1	2	3	4	5	6	7
Breite B [mm]	8	11,9	16	24	32	39,9	47,8
Höhe H [mm]	4,2	5,9	7,9	11,8	15,5	19,4	23,3
Seite S [mm]	8,2	12,3	16,4	24,7	32,8	41	49,3

Aufgrund der Geometrie dieser Störkörperformen bestehen zwei mögliche Anströmungsformen. Die erste Möglichkeit ist die am häufigsten verbreitete Form der Vortexmessung, bei der die Stirnfläche des Körpers angeströmt wird (Bild 6.22, links). Die Alternative dazu ist der in der Strömung um 180° gedreht eingesetzte und somit spitz angeströmte Körper (Bild 6.22, rechts).

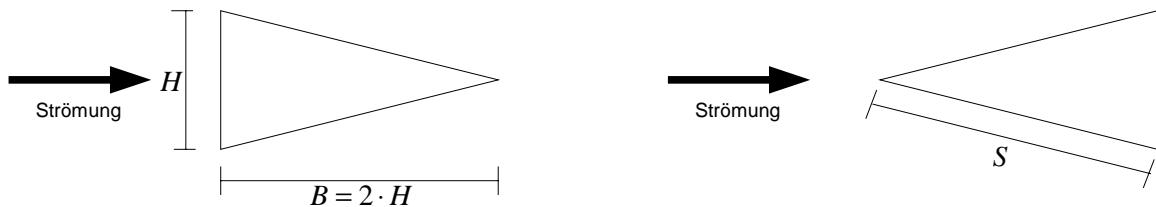


Bild 6.22: Mögliche Installationsarten des Delta-Störkörpers.

6.5.1.1 Der flach angeströmte Störkörper

Das Prinzip der Anströmung entspricht der in Bild 6.22 links vorgestellten Installationsart. Die Strömung prallt auf die Stirnfläche des Störkörpers. Die Wirbel lösen sich periodisch an den Kanten ab und modulieren die Ultraschallschranke. Die Modulation schlägt sich in der Amplitude und Phase nieder. Einen zusätzlichen Effekt stellt die Ablösung von Sekundärwirbeln dar, die erstmals in der Simulation gezeigt und messtechnisch in [16,17] nachgewiesen wurde. Durch die hohe Empfindlichkeit der Sensorik wird das Ultraschallsignal ebenfalls durch den Sekundärwirbel

6 Die Vortex-Durchflussmessung

beeinflusst. Die Entstehung der Wirbelbildung und deren Beeinflussung wird in Abschnitt 6.6 näher betrachtet.

Die Einführung einer geschwindigkeitsunabhängigen und dadurch mit allen Störkörpergeometrien vergleichbare Größe stellt die Empfindlichkeit E dar, die der Anzahl der Wirbel pro Meter Strecke mit der Einheit $[m^{-1}]$ entspricht.

$$E = \frac{f_w}{u_m} = konst. \quad (6.2)$$

Für jeden Störkörper ergibt sich eine spezifische konstante Empfindlichkeit, da die Wirbelfrequenz f_w proportional zur Strömungsgeschwindigkeit u_m ansteigt. Der Zusammenhang zwischen Empfindlichkeit E und Störkörpergröße H wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

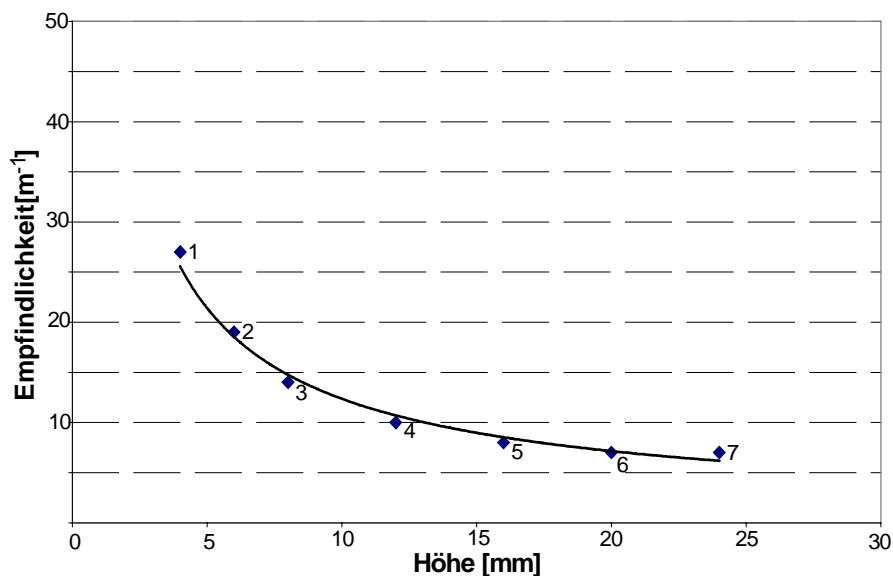


Bild 6.23: Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe des Delta-Störkörpers.

In der Darstellung ist zu erkennen, dass durch die Abmessung des Störkörpers kein linearer Einfluss auf die sich ablösenden Wirbel besteht. Um diesen Zusammenhang in Form einer Funktion darzustellen, wurde mit Hilfe einer Ausgleichskurve ein mathematischer Ansatz als Potenz Funktion $E = 77 \cdot H^{-0,79}$ erstellt. Die Konstante bezieht sich auf die Geometrie des Störkörpers. Inwiefern dieser potentielle Ansatz bei variierender Störkörpergröße in irgendeiner Form auf einen Zusammenhang mit

6 Die Vortex-Durchflussmessung

den physikalischen Gegebenheiten in der Vortexmessung erkennen lässt, wird im weiteren Verlauf untersucht.

6.5.1.2 Der spitz angeströmte Störkörper

Durch den entgegengesetzten Einbau des Störkörpers in die Messkammer werden höhere Wirbelfrequenzen erzielt. Ein Vergleich erfolgt durch die folgende Abbildung.

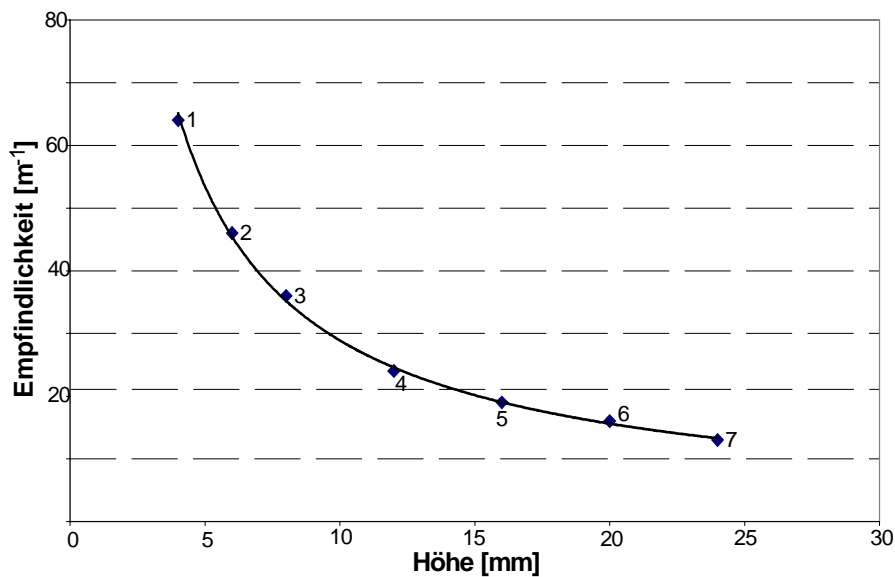


Bild 6.24: Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe des Delta-Störkörpers.

Die Ausgleichskurve wird zu $E = 223 \cdot H^{-0,89}$ ermittelt. Die Empfindlichkeitskennlinie verläuft steiler als diejenige des flach angeströmten Störkörpers. Vom Projektionsquerschnitt her zu urteilen, passiert die Strömung denselben Querschnitt wie beim flach angeströmten Delta-Störkörper. Es stellt sich die Frage nach der Ursache für die unterschiedlichen Empfindlichkeiten (siehe Abschnitt 6.6).

6.5.2 Die Gewindestange

Als Störkörper wurden handelsübliche Gewindestangen in den Größen M3 bis M30 verwendet. Es handelt sich hierbei um 12 Störkörper mit Normgewinde, die untersucht wurden und deren Empfindlichkeit in Bild 6.24 aufgeführt ist.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

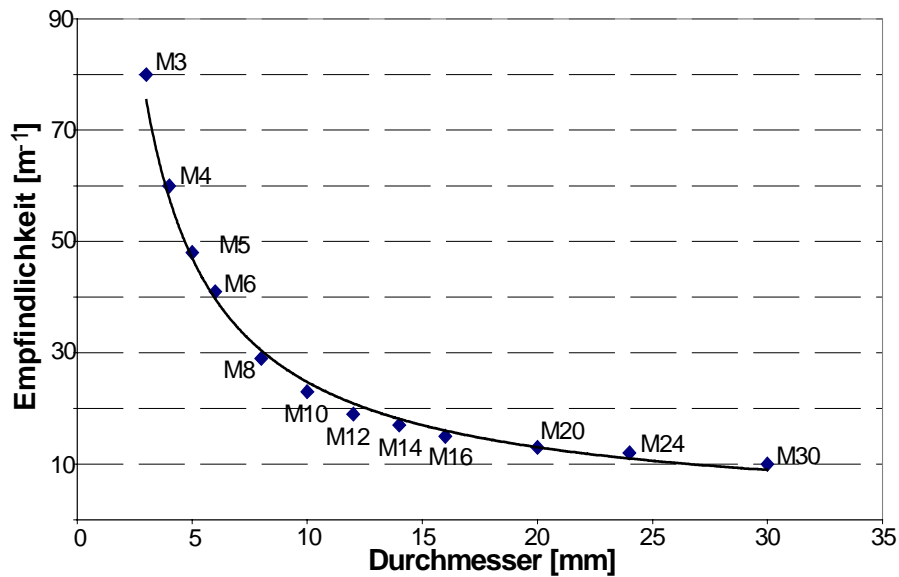


Bild 6.25: Empfindlichkeit in Abhängigkeit vom Durchmesser der Gewindestange.

Der Ansatz der Ausgleichskurve entspricht der Potenz-Funktion $E = 208 \cdot H^{-0,93}$. Der Potenzansatz der Gewindestange liegt in der Größenordnung des spitz angeströmten Delta-Störkörpers.

6.5.3 Das T-Profil

Als Störkörper wurden 5 T-Profile mit einem Breite-/Höheverhältnis von 1 und 5 T-Profile mit einem Breite-/Höheverhältnis von 2 untersucht. Die Abmessungen der T-Profile sind tabellarisch aufgeführt.

Tab. 6.2: Numerierung der verwendeten T-Profile.

Störkörper	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Breite B [mm]	6,1	12	16	20,2	24	12,1	23,9	32,1	40,1	48,2
Höhe H [mm]	6	12,1	16	20,2	24,2	6	12,1	16,1	20,2	24,1

Auch bei diesem Störkörper sind, vergleichbar mit dem Delta-Störkörper, zwei Einbauarten möglich.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

6.5.3.1 Das flach angeströmte T-Profil

In der folgenden Darstellung sind zwei Empfindlichkeitskennlinien in Abhängigkeit der unterschiedlichen Breite-/Höheverhältnisse aufgetragen ($\frac{B}{H}=1$ Störkörper: A-E, $\frac{B}{H}=2$ Störkörper: F-J).

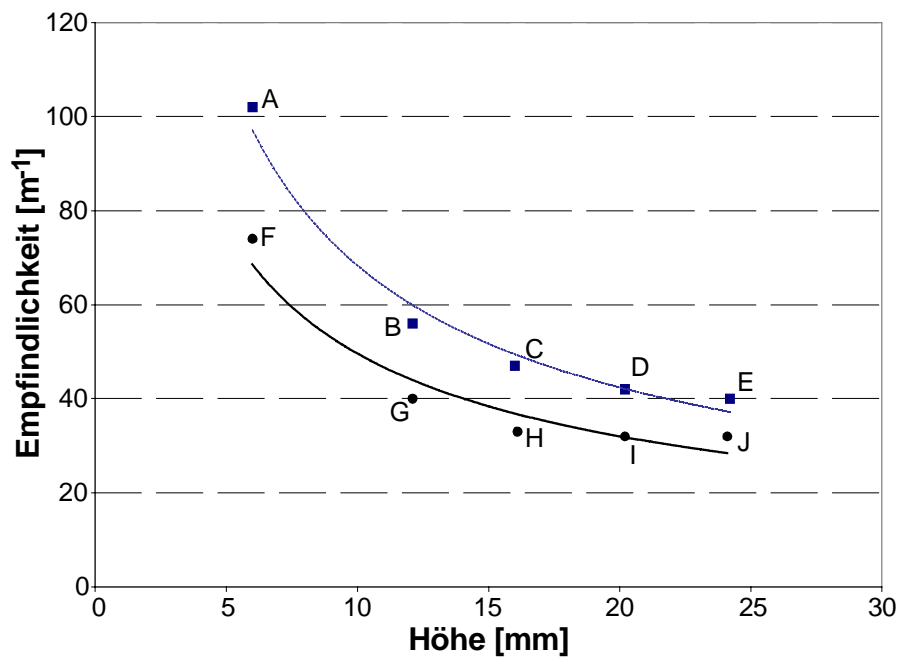


Bild 6.26: Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe des T-Profils.

Anders als beim flach angeströmten Delta-Störkörper sind die Empfindlichkeiten höher, der Verlauf jedoch fällt flacher aus, mit den Ansätzen der Ausgleichskurve $E = 333 \cdot H^{-0,69}$ für die Körper A-E und $E = 213 \cdot H^{-0,63}$ für die Körper F-J. Die Steigung der Empfindlichkeitskennlinien ist nahezu konstant. Im Durchschnitt ist die Empfindlichkeit des T-Profils bei einem Breite-/Höheverhältnis von 1 um ca. $12m^{-1}$ höher.

6.5.3.2 Das spitz angeströmte T-Profil

Auch für diese Installationsart werden die Empfindlichkeitskennlinien der unterschiedlichen Breite-/Höheverhältnisse dargestellt.

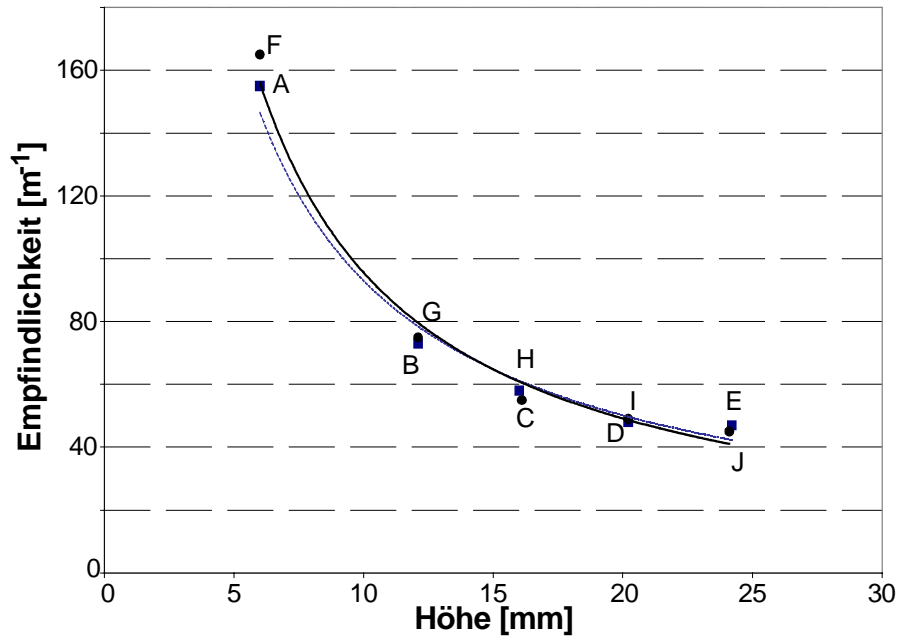


Bild 6.27: Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Höhe des T-Profiles.

Auffällig sind die Verläufe der Kennlinien, die sowohl für die Körper A-E mit dem Ansatz $E = 722 \cdot H^{-0,89}$ als auch für die Körper F-J mit dem Ansatz $E = 871 \cdot H^{-0,96}$ nahezu die gleiche Empfindlichkeitscharakteristik aufzeigen, trotz des unterschiedlichen Breite-/Höheverhältnisses. Die Fragen bezüglich der unterschiedlichen Empfindlichkeiten, die in den letzten Abschnitten aufgekommen sind, werden im nächsten Kapitelabschnitt behandelt.

6.6 Ursachen für unterschiedliche Empfindlichkeiten

Erklärungen für diesen Effekt sind in der Strömungstechnik zu suchen. Vom Verdrängungsvolumen her zu urteilen, unabhängig von der Einbauart des Störkörpers, sind keine Unterschiede festzustellen. Die Anströmung der Stirnseite des Störkörpers stellt einen sehr hohen Widerstand dar, und die auftreffende Strömung wird um einen sehr steilen Winkel abgelenkt. Dieser Effekt führt auf der Rückseite des Störkörpers zu sehr großen Wirbeln mit einer globalen Beeinträchtigung des Strömungsfeldes. Ein Teil des Fluides strömt mit gleicher Frequenz in den Anströmbereich zurück und beeinflusst die nächste Wirbelablösung auf der unteren Kante des Störkörpers. Das Strömungsfeld vor der flachen Anströmfläche schwingt also im Takt der Wirbelentstehung. Die große Menge des schwingenden Fluides weist eine relativ grosse Trägheit aus. In Verbindung mit den

6 Die Vortex-Durchflussmessung

großen Wirbeln resultieren nur kleine Wirbelfrequenzen. Der Primärwirbel rollt entlang der Flanke des Störkörpers und löst sich unter Bildung eines Sekundärwirbels ab [28]. Die Ultraschallschranke erfasst ebenfalls die generierten Sekundärwirbel. Abhängig von der Ausbildung der Rückflanke überlagern die Frequenzen der Sekundärwirbel die Frequenzen der Primärwirbel.

Die Wirbelstrukturen lösen sich abwechselnd an beiden Kanten ab. Die einseitige Wirbelfolge entspricht der Wirbelfrequenz. Die Wirbelfolge an der gegenüberliegenden Kante ist um die halbe Periodendauer zeitversetzt und entspricht ebenfalls der Wirbelfrequenz. Durch den Einsatz von Ultraschall werden beide generierten Wirbelfolgen erfasst, wodurch dem Signal die zweifache Wirbelfrequenz aufgeprägt wird, was der Modulationsfrequenz entspricht.

Sowohl der spitz angeströmte Delta-Störkörper als auch das spitz angeströmte T-Profil führen zu einer symmetrischen Teilung der Strömung. Diese reißt unter flachem Winkel lokal am Ende des Keiles ab und hat sehr kleine Wirbel mit entsprechend hoher Frequenz zur Folge.

Die Größenordnung der Wirbelbildung ist abhängig von dem verwendeten Strömungsquerschnitt und der Höhe bzw. Widerstandsfläche des Störkörpers. Im folgenden wird beispielsweise der Delta-Störkörper näher betrachtet, für den in Tabelle 6.3 entsprechende Faktoren definiert werden.

Tab. 6.3: Flächen- und Empfindlichkeitsverhältnis der jeweiligen Delta-Störkörper.

Nummer	1	2	3	4	5	6	7
A	18,7	13,38	9,96	7,63	5,11	4,09	3,44
r_w	2,37	2,42	2,57	2,4	2,38	2,29	1,86

Die Faktor A berücksichtigt das Flächenverhältnis des Rohrquerschnittes zum Projektionsquerschnitt des Störkörpers. Das Verhältnis der Empfindlichkeiten des spitz zum flach angeströmten Störkörper wird durch den Faktor r_w berücksichtigt.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Empfindlichkeiten bei unterschiedlicher Anströmung der Störkörper in einem eindeutigen Verhältnis zueinander stehen. Der Vergleich der jeweiligen Empfindlichkeiten ergab, dass die Empfindlichkeit des spitz angeströmten Störkörpers um den Faktor $r_w = 2,39$ höher liegt. Der resultierende Wert des Störkörpers Nr. 7 ist auf eine nicht mehr natürliche Ausbildung der Wirbelstrasse aufgrund der Begrenzung durch die Rohrwand zurückzuführen, wodurch die Ausprägung der Wirbel eingeschränkt wird. Der Faktor A klingt mit zunehmender Größe des Störkörpers bezogen auf den Rohrquerschnitt ab. Eine Ausgleichskurve durch diese Werte ergibt ebenfalls einen potentiellen Ansatz der Form $E = konst \cdot H^{-0,9}$. Dieser Ansatz ist vergleichbar mit denen der spitz angeströmten Störkörper. Somit ist die Wirbelfrequenz des spitz angeströmten Störkörpers eine Funktion, die abhängig vom Anströmwinkel ϑ des Körpers und dem Faktor A ist ($f_{spitz} = f(\vartheta, A)$). Im Gegensatz dazu ist die Wirbelfrequenz des flach angeströmten Störkörpers von drei Parametern abhängig: $f_{flach} = f(\vartheta, A, \frac{1}{r_w})$.

6.7 Vergleich der Störkörpergeometrien

In den Bildern 6.24 und 6.25 sind vergleichbare Ansätze zur Bestimmung der Empfindlichkeit in Abhängigkeit vom Störkörper dargestellt. Bedingt durch die Formgebung der Störkörper ist ein Vergleich nur eingeschränkt möglich. In der Strömungsmechanik ist ein Vergleich unterschiedlicher Querschnitte nur dann möglich, wenn dieselben Strömungsbedingungen Geltung haben. Durch die Gewährleistung einer symmetrischen Aufteilung der Strömung, dies trifft für die Gewindestange und für die spitz angeströmten Störkörper zu, wurde ein charakteristischer Durchmesser d_c eingeführt

$$d_c = \frac{4 \cdot A_s}{U_s}, \quad (6.3)$$

wobei A_s die Querschnittsfläche und U_s den Umfang des Querschnittes des Störkörpers berücksichtigt. Anhand dieser Vorgehensweise wird die Empfindlichkeit

6 Die Vortex-Durchflussmessung

abhängig vom charakteristischen Durchmesser des Störkörpers in der folgenden Abbildung dargestellt.

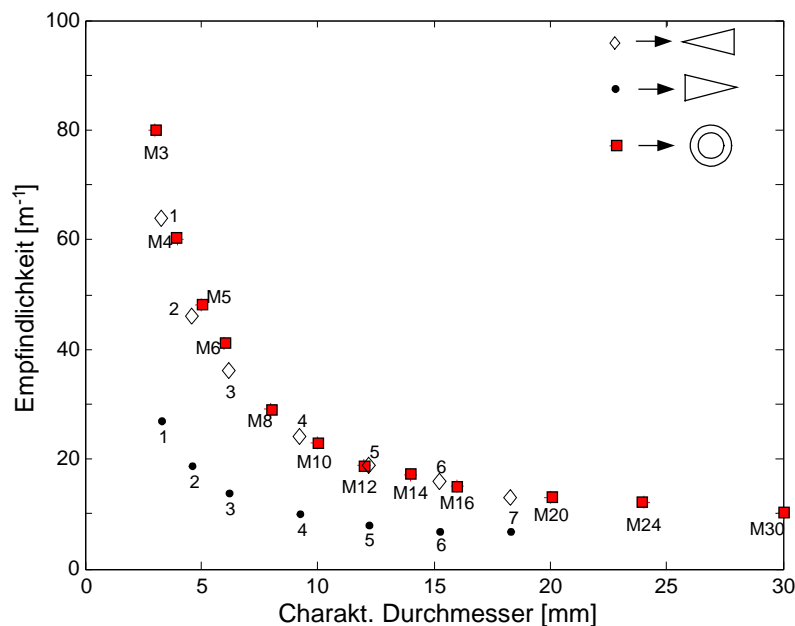


Bild 6.28: Vergleich der Empfindlichkeiten für unterschiedliche Störkörper.

Der Verlauf für die Gewindestange und derjenige für den spitz angeströmten Störkörper ist nahezu identisch. Dieser Zusammenhang ist auf ähnliche Anströmbedingungen zurückzuführen. Aufgrund der keilförmigen bzw. runden Kontur erfährt die Strömung eine symmetrische Aufteilung. Anhand dieses Ergebnisses tritt der Verlauf ähnlich dem in Bild 6.28 bei allen Störkörperformen auf, bei der eine gleichmäßig geführte Aufteilung der Strömung unter ähnlichen Winkeln erfolgt. Für den flach angeströmten Störkörper trifft dies nicht zu, da die Anströmbedingungen abweichen.

Auf die Darstellung der Empfindlichkeitskennlinie der T-Profile wird aufgrund identischer Verhältnisse des Querschnittes zum Umfang des Querschnittes verzichtet. Unter Gewährleistung der o.a. Rahmenbedingungen sind die gewonnenen Erkenntnisse auf die T-Profile übertragbar.

Zusätzlich wird der Durchflussfaktor von [2] betrachtet. Diese Kennzahl ist vom Durchfluss und der Dichte unabhängig. Der Durchflussfaktor berücksichtigt die Höhe des Störkörpers H , den Rohrdurchmesser D , sowie die Strouhal-Zahl St und wird formal angegeben zu

6 Die Vortex-Durchflussmessung

$$\frac{f}{\dot{V}} = \frac{4 \cdot Sr}{\pi \cdot D^3} \frac{1}{\frac{H}{D} \left[1 - \frac{4}{\pi} k \frac{H}{D} \right]}. \quad (6.4)$$

Der Ausdruck des Durchflussfaktors $\frac{f}{\dot{V}}$ entspricht dem Verhältnis der Wirbelfrequenz zum Volumenstrom. Der Störkörper-Koeffizient k berücksichtigt die Formgebung des Störkörpers in der Berechnung, z.B. $k = 1,1$ für Zylinder und $k = 1,5$ für dreieckige Störkörper [2]. Eine graphische Darstellung des berechneten Durchflussfaktors $\frac{f}{\dot{V}}$ in Abhängigkeit vom Durchlassverhältnis $\frac{H}{D}$ wird in der folgenden Abbildung gezeigt.

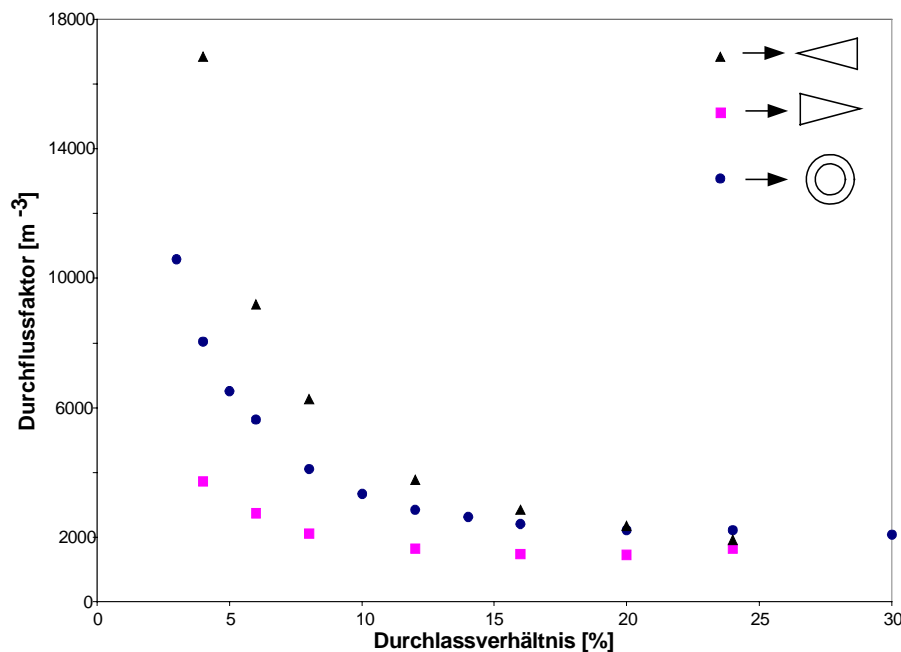


Bild 6.29: Kennlinienverlauf des berechneten Durchflussfaktors für verschiedene Störkörpergeometrien.

Mit den Vorgaben der Störkörper-Koeffizienten k nach [2] wäre eine Überlagerung aller drei Kennlinien zu erwarten. Dies trifft für dieses Anwendungsbeispiel nicht zu (Bild 6.29). Die in Bild 6.30 dargestellten Kennlinien resultieren aus den detektierten Wirbelfrequenzen.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

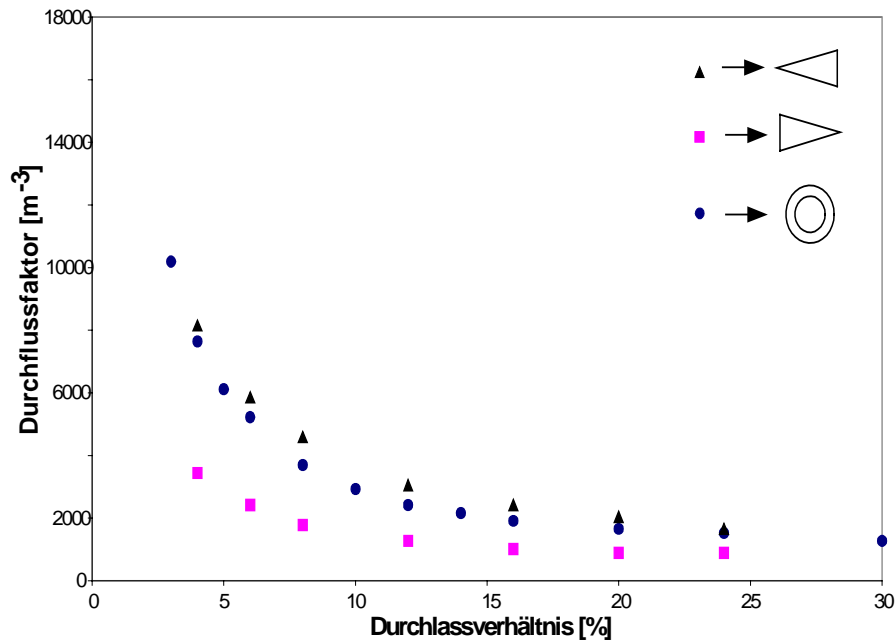


Bild 6.30: Experimentell bestimmte Durchflussfaktoren anhand gemessener Wirbelfrequenzen für verschiedene Störkörpergeometrien.

Der Verlauf der Kennlinien des spitz angeströmten Delta-Störkörpers und der der Gewindestange stimmen anhand der gemessenen Wirbelfrequenzen nahezu überein. Die nach [2] in Gleichung 6.3 aufgeführten Koeffizienten k lassen sich nicht mit reellen Messdaten reproduzieren. Ein neuer Zusammenhang in Abhängigkeit vom Koeffizienten k muss speziell für jede beliebige Störkörpergeometrie bestimmt werden. In diesem Zusammenhang seien auch die Beiträge [12,39] aufgeführt. Das optimale Durchlassverhältnis wurde mit 24% angegeben. Dieses kann nur auf Applikationen mit Drucksensoren zutreffen. Große Dimensionen führen zu Problemen in der Signalauswertung mittels Ultraschall. Für die Verwendung von Ultraschall eignen sich nur kleinere Störkörper mit hohen Empfindlichkeiten, was auch zu einer Reduzierung des Druckverlustes führt.

6.8 Kalibrierung von Vortexmetern

Wie bei vielen Messgeräten ist auch bei Vortexmetern eine Kalibrierung durchzuführen. Jede Messung wird von systematischen bzw. zufälligen Messabweichungen beeinflusst. Beispielsweise wurden für eine M5-Gewindestange 50 Messungen pro Geschwindigkeitsstufe im Bereich von $2\text{ m/s} - 25\text{ m/s}$ aufgenommen. Der daraus resultierende Mittelwert und die resultierende Streuung

6 Die Vortex-Durchflussmessung

wird in Bild 6.31 in Form einer Geschwindigkeits-Wirbelfrequenz-Kennlinie dargestellt.

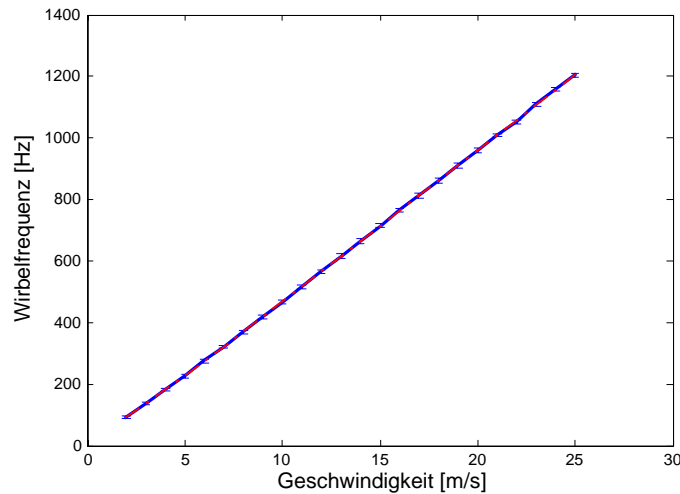


Bild 6.31: Geschwindigkeits-Wirbelfrequenz-Kennlinie für die M5-Gewindestange.

Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Wirbelfrequenz ist als lineare Kennlinie ermittelt worden. In der Abbildung ist die Streuung für jede einzelne Geschwindigkeitsstufe dargestellt. Je geringer die Streuung, um so präziser erweist sich das Messverfahren. Die maximale Streuung beträgt 8 Hz bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 17 m/s . Das entspricht einer relativen Abweichung der Frequenz von 1% .

Dieser erste Datensatz dient als Kalibrierung eines zweiten Datensatzes, um die entsprechende Messunsicherheit von Vortexmetern zu ermitteln.

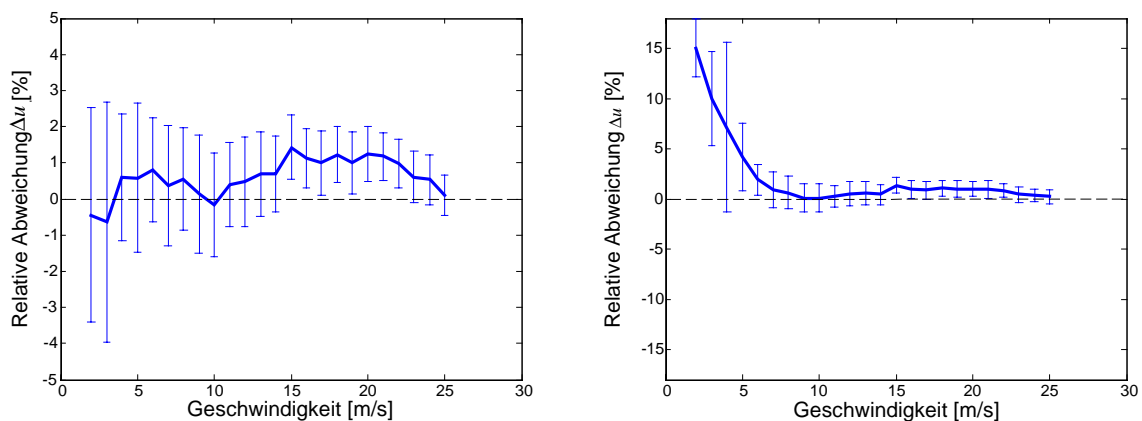


Bild 6.32: Messunsicherheit eines mit einer M5-Gewindestange bestückten Vortexmeters, Auswertung der Phase (links) und der Amplitude (rechts).

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Die relative Abweichung Δu entspricht formal der kalibrierten Geschwindigkeit u_{mess} , die aus der gemessenen Wirbelfrequenz durch Gleichung 6.1 berechnet und auf den Referenzwert u_{ist} , der dem Wert am Turbinenradgaszähler entspricht, bezogen wird:

$$\Delta u = \frac{u_{mess} - u_{ist}}{u_{ist}}. \quad (6.4)$$

Die in Bild 6.31 dargestellte Messunsicherheit zeigt deutlich, dass sich die demodulierte Phase besser zur Auswertung der Wirbelfrequenz eignet. Durch die Kalibrierung sind Abweichungen der Mittelwerte von bis zu 1,5% möglich. Die Standardabweichung streut mit bis zu 3% bei niedrigen Geschwindigkeiten und reduziert sich auf unter 1% mit steigender Geschwindigkeit. Die Informationen, die aus der demodulierten Amplitude gewonnen werden, zeigen zumindest im niedrigen Geschwindigkeitsbereich hohe Messabweichungen auf, die durch Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit auf unterhalb von 2% reduziert werden.

Die Kalibrierung gibt einen Eindruck von der Präzision der Messvorrichtung. Die resultierenden Abweichungen sind auf die schwankende Wirbelablösung in der Rohrströmung zurückzuführen. Die Auflösung der Frequenzbestimmung im Spektrum liegt bei $0,6\text{Hz}$ zwischen den einzelnen Samples und kann somit als Einflussfaktor für die Messabweichung vernachlässigt werden. Der Einsatz von Vortexmetern lässt eine präzise Aussage über vorherrschende Strömungsgeschwindigkeiten nur bei der Auswertung der Phaseninformation zu. Die Verwendung von Gewindestangen als Störkörper erzeugt vergleichbar zu Delta-Störkörpern eine stabilere Wirbelbildung, so dass durch Variation der Störkörpergeometrie Messunsicherheiten nicht weiter reduziert werden können. Im Vergleich dazu liegen die Messabweichungen für kalibrierte Korrelatoren unterhalb 2% [26].

6.9 Störeinflüsse

Neben der gewünschten Beeinflussung der Rohrströmung, durch die Einbauten in der Messkammer zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wirbelablösung, stellen zusätzliche Störungen, wie z.B. Einfach- und Raumkrümmer, einen weiteren Einfluss auf das Geschwindigkeitsprofil und dadurch

6 Die Vortex-Durchflussmessung

auf das Messverfahren dar. Nicht immer können im industriellen Bereich die notwendigen Einlaufstrecken berücksichtigt werden, damit ein ungestörtes Profil vorliegt. Messsysteme sind auch auf diese Art von Einflüsse zu untersuchen.

6.9.1 Umlenkung der Strömung

In Abbildung 6.32 sind die Strömungsprofile hinter einem Einfach- und einem Raumkrümmer dargestellt. Die unsymmetrische Geschwindigkeitsverteilung hinter einem Einfachkrümmer basiert auf die Einwirkung von Zentrifugalkräften, so dass sich das Maximum der Geschwindigkeit in den Außenbereich verlagert. Zusätzlich wird bei der Betrachtung des Strömungsquerschnittes die Hauptströmung von einer Querströmung überlagert, die sich in Form eines Doppelwirbels als Ergebnis der Beeinflussung der Zentrifugalkräfte bemerkbar macht (Bild 6.33, links).

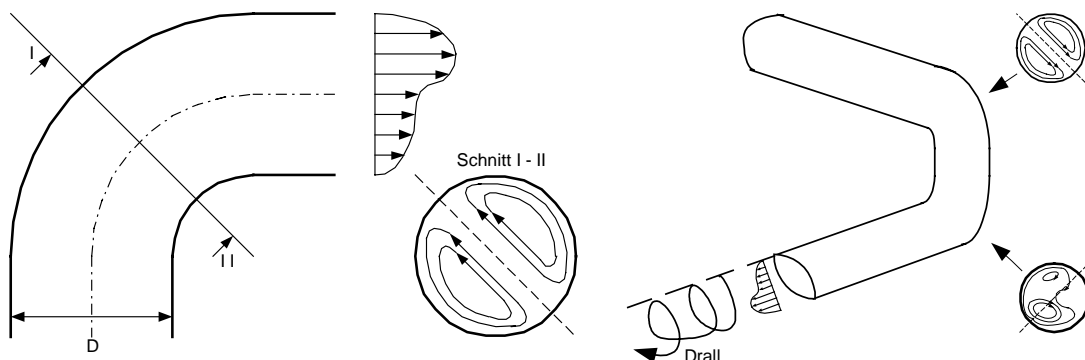


Bild 6.33: Strömungsprofil hinter einem Einfach- (links) und einem Raumkrümmer (rechts).

Bei der Betrachtung eines Raumkrümmers (Bild 6.33, rechts) entsteht hinter dem ersten Einfachkrümmer die zuvor beschriebene unsymmetrische Geschwindigkeitsverteilung, der daraus resultierende Doppelwirbel tritt in den um 90° gedrehten Einfachkrümmer ein und erzeugt einen weiteren Doppelwirbel. Die beiden zueinander versetzten Doppelwirbel erzeugen ein drallförmiges Strömungsprofil.

Eine Untersuchung des Einflusses der unsymmetrischen bzw. drallbehafteten Strömung erfolgte für das Störkörpersortiment der Gewindestangengrößen M3 bis M30 in einem Abstand von $2D$. Gewindegrößen unterhalb M5 und oberhalb M20

6 Die Vortex-Durchflussmessung

reagieren für eine Ultraschall-Applikation zu empfindlich auf die gestörten Profile insbesondere hinter dem Einfachkrümmer.

Die Ablösefrequenz der Wirbelstrukturen hat sich im Vergleich zur ungestörten Strömung nahezu verdoppelt (vgl. Bild 6.25). Bild 6.34 stellt eine Übersicht der Empfindlichkeiten von Gewindestangen bezogen auf gestörte Strömungsprofile dar. Auffällig ist die höhere Ablösefrequenz hinter dem Raumkrümmer bei kleinen Störkörperabmessungen, die mit zunehmender Störkörpergröße mit der Ablösefrequenz hinter Einfachkrümmern nahezu übereinstimmt. Die Ursache der höheren Wirbelfrequenz liegt im vorliegenden unsymmetrischen Strömungsprofil. In drallbehafteten Strömungen sind die Ablösefrequenzen eindeutiger auszuwerten aufgrund einer stabileren Wirbelstrasse. Hinter Einfachkrümmern unterliegen die einzelnen Messungen einer zu großen Streuung.

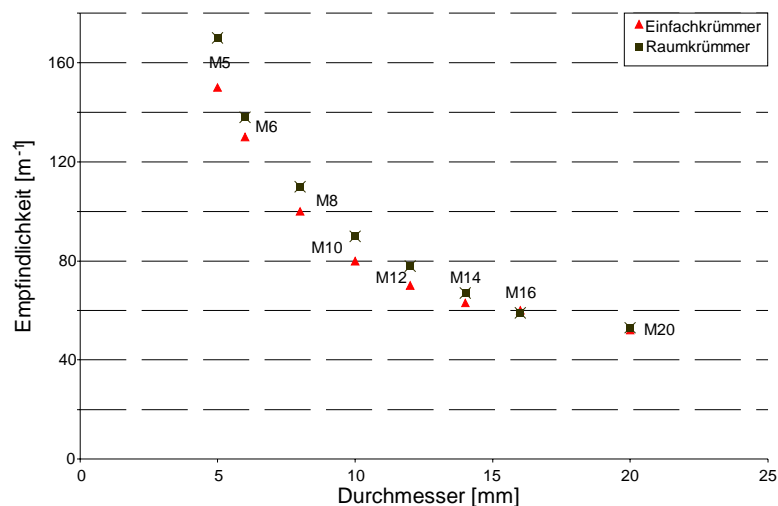


Bild 6.34: Vergleich der Empfindlichkeiten der verschiedenen Gewindestangen für unterschiedlich gestörte Strömungsprofile.

Eine zuverlässige Messung der Wirbelfrequenz für gestörte Strömungsprofile ist nicht eindeutig durchführbar. Die drallbehaftete liefert vergleichbar zur unsymmetrischen Strömung wesentlich bessere Ergebnisse mit einer geringeren Streuung, ist jedoch für eine präzise Auswertung nicht einsetzbar.

6.9.2 Pulsation

In der Praxis spielt auch die Art der Förderung des Mediums eine entscheidende Rolle zur Auslegung eines Durchflusssystems. Es kommt häufig vor, dass Medien in den Leitungen nicht kontinuierlich gefördert werden, woraus ein instationärer Transport in Form von Pulsationen resultiert. Insbesondere bei Vortexzählern stellt der pulsartige Transport hohe Erwartungen an das Messsystem. Bei einem kontinuierlichen Fluss des Mediums ist ein direkter Zusammenhang zwischen der Wirbelfrequenz und der Fließgeschwindigkeit gegeben. Ruckartige Bewegungen des Fluides führen zu einer direkten Beeinflussung der Wirbelablösung, woraus abhängig vom Messzeitpunkt unterschiedliche Ergebnisse resultieren. Diesen Einfluss gilt es nun näher zu untersuchen. Erste Ergebnisse auf diesem Gebiet wurden von *Windorfer* präsentiert. Bei der Erzeugung einer pulsierenden Strömung fand eine rotierende Klappe Anwendung. Über frei wählbare Parameter wie z.B. der Durchmesser oder die Frequenz konnte der Einfluss unabhängig vom Volumenstrom untersucht werden. Die Pulsation mittels rotierender Klappe stellte keine wesentliche Beeinflussung auf die Wirbelablösung und somit auf das Messsystem dar [37].

In dieser Arbeit wurde der Einfluss eines Drehkolbenzählers auf das Ultraschallsignal untersucht. Drehkolbenzähler (DKZ) werden in den meisten Fällen als aktive Volumenförderer angewandt. Zwei in der Strömung befindliche Ovalräder transportieren das Medium abwechselnd durch die untere bzw. obere Kammer. Durch dieses Förderprinzip wird nur das Volumen der Kammer pulsartig freigegeben, dies entspricht pro Umdrehung eines Drehkolbens einem vierfachen Kammervolumen. In diesem Beispiel wurde der DKZ passiv betrieben, wodurch ein direkter Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit u_{ist} und Drehfrequenz f_{DKZ} gegeben ist [6]:

$$f_{DKZ} = 3,068 \cdot u_{ist} . \quad (6.5)$$

Zunächst wurde der Einfluss der Pulsation auf das Ultraschallsignal ohne Störkörper untersucht. Bild 6.35 zeigt das Ergebnis der Auswertung.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

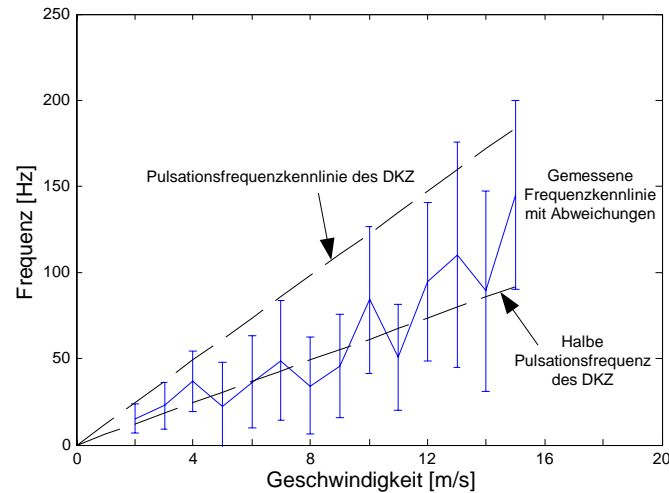


Bild 6.35: Einfluss der pulsierenden Strömung auf das Ultraschallsignal ohne Störkörper.

Das Ultraschallsignal schwankt in der Frequenz und wird nur mit der halben Pulsationsfrequenz des DKZ moduliert. Diese Beeinflussung resultiert aus der subharmonischen Eigenschwingung der Luft, die mit einer Frequenz von $f_{DKZ}/2$ dominanter ist und somit ein stabileres Ergebnis liefert, was einen Vergleich mit der Karman'schen Wirbelstrasse zulässt [29]. Die Untersuchung des Einflusses der Pulsation auf die Vortexmessung erfolgte für eine M5-Gewindestange. Das folgende Bild stellt im Gegensatz zu Bild 6.31 die Geschwindigkeits-Frequenz-Kennlinie in Abhängigkeit von einer pulsierenden Strömung hervorgerufen durch den passiven Betrieb des DKZ dar.

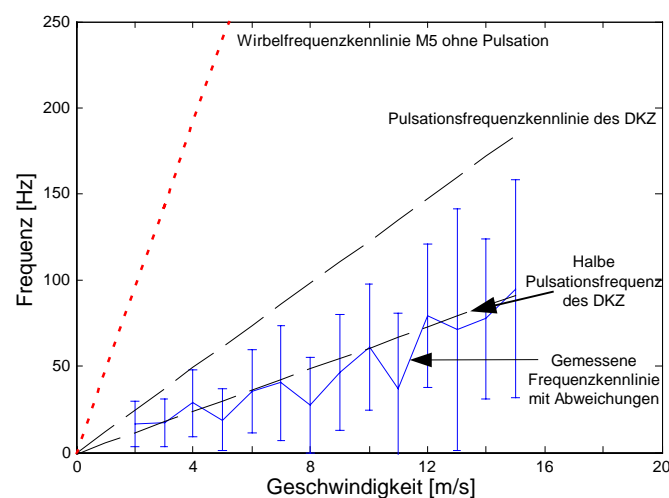


Bild 6.36: Geschwindigkeits-Frequenz-Kennlinie für die M5-Gewindestange bei pulsierender Strömung.

6 Die Vortex-Durchflussmessung

Bedingt durch den Abstand zwischen Störkörper und DKZ von $2D$ hat die Pulsation einen direkten Einfluss auf die Vortexmessung. Die gemessene Frequenzkennlinie schwankt um die Kennlinie der halben Pulsationsfrequenz des DKZ (Bild 6.36). Zur deutlichen Veranschaulichung ist die Wirbelfrequenz-Kennlinie der M5-Gewindestange dargestellt. Die hinter dem Störkörper generierten Wirbel werden durch die pulsartige Bewegung der Strömung zerschlagen. Die gemessene Kennlinie in Bild 6.36 ist identisch mit der in Bild 6.35 dargestellten Kennlinie. Der Einbau einer M5-Gewindestange wird vom Ultraschallsignal aufgrund der kleinen Geometrie nicht registriert.

Für die Vortexmessung im praktischen Einsatz finden deltaförmige Störkörper Anwendung. Durch die Abmessung des Störkörpers (vgl. Kapitel 6.5.1 Störkörper-Nr. 7) liegt die Wirbelfrequenz in der Nähe der Pulsationsfrequenz. Ein Effekt, der in der Literatur als Lock-In bezeichnet wird, stellt das Einrasten der Wirbel auf die Pulsationsfrequenz dar. *Windorfer* konnte bei seiner Untersuchung mittels rotierender Klappe bei konstanter Pulsationsfrequenz keinen Lock-In Effekt feststellen. Die Darstellung in Bild 6.37 zeigt die Beeinflussung des DKZ auf die Wirbelablösung des flach angeströmten Delta-Störkörpers.

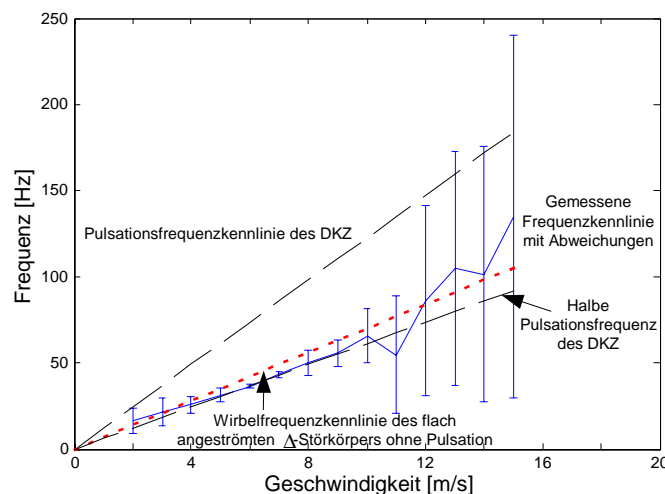


Bild 6.37: Geschwindigkeits-Frequenz-Kennlinie für den flach angeströmten Delta-Störkörper bei pulsierender Strömung.

Die zum Vergleich eingezeichnete Wirbelfrequenz-Kennlinie des flach angeströmten Delta-Störkörpers zeigt bei vorliegender Pulsation keine Übereinstimmung mit der

6 Die Vortex-Durchflussmessung

gemessenen Frequenzkennlinie. Hier tritt der Lock-In Effekt bei der halben Pulsationsfrequenz auf. In den Untersuchungen von [29] wurde gezeigt, dass der Lock-In Effekt verstärkt beim Verhältnis der Wirbel- zur Pulsationsfrequenz in Höhe von $f_w / f_p = 0,5$ hervorgerufen wird. Dieser Effekt ist in Bild 6.37 deutlich dargestellt. Da die Frequenzen nahe beieinander liegen, führt dies zu einer Überlappung im Spektrum. Daraus resultiert eine Addition beider Amplituden, wodurch die Pulsationsfrequenz im Spektrum dominiert. Durch den entgegengesetzten Einbau des Störkörpers wird folgendes Ergebnis erzielt (Bild 6.38).

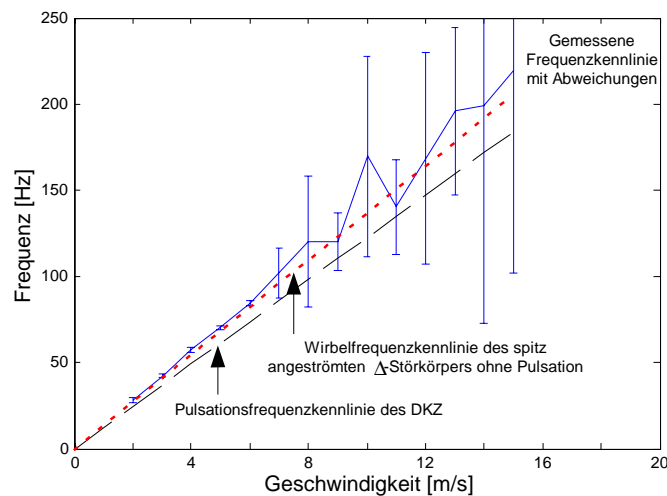


Bild 6.38: Geschwindigkeits-Frequenz-Kennlinie für den spitz angeströmten Delta-Störkörper bei pulsierender Strömung.

Der Lock-In Effekt tritt nur für nahe beieinander liegende Frequenzen auf. Eine Beeinflussung beim entgegengesetzten Einbau des Störkörpers liegt nicht vor. In Bild 6.38 entspricht der gemessene Frequenzverlauf im Mittel dem Verlauf der Wirbelfrequenz-Kennlinie. Die Wirbelfolge bei der Verwendung eines spitz angeströmten Delta-Störkörpers bleibt unbeeinflusst von der pulsartigen Bewegung der Strömung.

Im Gegensatz zu *Windorfers* rotierender Klappe stellt der komplett verschlossene Querschnitt des DKZ mit pulsartigen Volumenstößen eine direkte Beeinflussung auf die Vortexmessung dar. Der zuverlässige Einsatz der Vortexmessung für derartige Betriebsbedingungen ist abhängig von dem Einbau und der Abmessung des Störkörpers, sowie der Entfernung zur Störquelle.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit sind neue Erkenntnisse sowohl auf dem Gebiet der Korrelations- als auch der Vortexmessung vorgestellt worden. Diese Ergänzungen basieren auf den bisher vorgestellten Beiträgen von Skwarek [36], Windorfer [37] und Niemann [26].

In Kapitel 2 wurde der theoretische Hintergrund der in dieser Arbeit untersuchten Ultraschall-Durchflussmessverfahren dargestellt. Kapitel 3 beschäftigte sich mit den grundlegenden Aspekten der Wechselwirkung zwischen Strömung und Ultraschallsignal. Die Modulation des Ultraschallsignals ist abhängig von einer Vielzahl von Parametern, die in komplexer Art und Weise dem Signal aufgeprägt werden und als Informationen in der demodulierten Amplitude und Phase zur Auswertung vorliegen.

In Kapitel 4 wird zum bisher angewandten Demodulationsverfahren (QAD) das Kalmanfilter als neues Demodulationsprinzip vorgestellt, dass als Schätzverfahren für die Rekonstruktion des Phasenverlaufs entwickelt wurde. Ein Vergleich zur QAD zeigt keinen Unterschied im Phasenverlauf bei niedrigen Modulationsintensitäten auf. Mit zunehmender Modulationsintensität nimmt die Amplitude des Phasensignals ab und die rekonstruierte Phase wird als entauschter und gemittelter Verlauf dargestellt. Eine anschließende Simulation konnte die Beeinflussung des Kalmanfilter durch die AM aufzeigen. Das Kalmanfilter rekonstruiert einen Phasenverlauf in Abhängigkeit vom Einfluss der AM. In Verbindung mit den rekonstruierten Verläufen der reellen Signale stellt sich eine Mittelwertbildung ein. Dies trifft für große Modulationsintensitäten zu, wo die Rekonstruktion der QAD aufgrund des eingeschränkten Wertevorrats versagt.

Für die in Kapitel 5 vorgestellte Korrelationstechnik wurden die zum einen mittels QAD und zum anderen mittels Kalmanfilter demodulierten Signale korreliert. Der Vorteil des Kalmanfilters besteht bei hohen Modulationsintensitäten, insbesondere bei gestörter Strömung, wodurch bessere Ergebnisse mit höheren Korrelationsmaxima erzielt wurden. Zudem kann auf die in [26] entwickelte Nullphasenkorrektur verzichtet werden. Ein weiterer Schritt der Korrelationstechnik in Richtung Mehrpfadmessung ermöglicht es, durch eine geeignete Wahl der Messkammer das Strömungsprofil tomographisch darzustellen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Auch für die Vortexmessung erfolgten weiterführende Untersuchungen. Durch die neue Phasenrekonstruktion nach Niemann [26] bzw. des Kalmanfilters war auch die Auswertung der Phaseninformation möglich, wodurch stabilere Ergebnisse erzielt wurden. Neben der digitalen Demodulation wurden im weiteren Verlauf auch analoge Demodulatoren untersucht. Die analogen Verfahren erzielten in Abhängigkeit von der Modulationsintensität teilweise bessere Ergebnisse. Die Fragestellung nach dem Einsatz der analogen bzw. digitalen Demodulation kann nur in Verbindung mit der anschließenden Signalverarbeitung beantwortet werden, in welcher Form das Signal benötigt wird.

Eine weitere Untersuchung erfolgte für unterschiedliche Trägerfrequenzen. Es konnten unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen dem Trägersignal und dem eingesetzten Störkörper festgestellt werden. Hohe Trägerfrequenzen sind für kleine Störkörper geeignet. Es wurde eine Vielzahl verschiedener Störkörpergeometrien untersucht, und für drei Störkörperformen ist eine Systematik erstellt worden. Unter Beachtung bestimmter Randbedingungen konnte mit Hilfe einer neu definierten Kenngröße eines charakteristischen Durchmessers die gleiche Kennliniencharakteristik für verschiedene Störkörpergeometrien dargestellt werden. Mit der Kalibrierung des Vortexmeters wurden durch die Auswertung der Phase Messabweichungen von bis zu $\Delta u = 1,5\%$ erreicht, die Auswertung der Amplitude führte zu höheren Messabweichungen. Störeinflüsse, wie sie hinter Einfach- und Raumkrümmer auftreten, führten zu einer Erhöhung der Wirbelfrequenz um den Faktor 2 aufgrund des gestörten Strömungsprofils. Die Pulsation als Störquelle auf die Ultraschallsignale ist abhängig von der Geometrie bzw. vom Einbau des Störkörpers. Der Einfluss des Lock-In Effektes konnte beim flach angeströmten Delta-Störkörper festgestellt werden. Der um 180° gedreht eingesetzte und spitz angeströmte Störkörper zeigte keine Beeinflussung durch die Pulsation auf.

In dieser Arbeit werden neue Fragen aufgeworfen, die eine Weiterführung auf diesem Gebiet ermöglichen:

- Das Kalmanfilter hat für hohe Modulationsintensitäten gute Ergebnisse erzielt, aber es bedarf weiterer Optimierungsarbeiten.
- Auf dem Gebiet der Vortexmessung wurde eine Systematik unterschiedlicher Störkörperformen für einen bestimmten Rohrdurchmesser erstellt. Die

7 Zusammenfassung und Ausblick

Untersuchung für andere Durchmesser und die Ermittlung der daraus resultierenden Empfindlichkeitskennlinien stellen weiteren Forschungsbedarf dar.

- Der Einfluss der Pulsation, generiert durch eine rotierende Klappe bzw. durch einen Drehkolbenzähler, ist für eine korrelative Auswertung noch nicht untersucht worden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Balzer, D.: „Online-Demodulation stark gestörter winkelmulierter Signale mit dem Extended Kalman-Filter“, Dissertation, Universität Siegen, 1999.
- [2] Bentley, J.: „Principles of measurement systems“, Longman 1983.
- [3] Bonfig, K. W.: „Durchflussmessung von Flüssigkeiten und Gasen“, expert-Verlag 1990.
- [4] Demolis, J.: „Reconstruction du profile de vitesse d'un écoulement d'air en conduite par tomographie ultrasonore“, Dissertation, ENSAE 1997.
- [5] Derichs, W. J.: „Einsatz der Schallpyrometrie zur Temperaturmessung in großen Feuerräumen“, Dissertation, RWTH Aachen, Shaker 1996.
- [6] Produktdatenblatt RGV Drehkolbenzähler der Fa. Elster Amco, 09/2000.
- [7] Filips, C., Hans, V.: „Tomographic imaging of gas flow profiles with few information“, Sensor 2001, Proceedings, S. 47-52, Nürnberg.
- [8] Filips, C., Hans, V.: „Tomographische Darstellung des Strömungsprofils mit wenigen Daten“, tm-Technisches Messen, Heft 5 S. 226-233, 68. Jahrgang 2001.
- [9] Filips, C., Hans, V.: „Einfluss von Störkörpergrößen auf die Empfindlichkeit von Vortexmetern mit Ultraschall“, 11. ITG/GMA-Fachtagung „Sensoren und Messsysteme“, Proceedings S. 363-366, Ludwigsburg, 2002.

8 Literaturverzeichnis

- [10] Filips, C., Hans, V.: „Comparison of analogous and digital demodulation methods of modulated ultrasonic signals in vortex flow metering“, Proceedings of the 19th IEEE Volume 2, S. 1657-1660, Anchorage, 2002.
- [11] Filips, C., Hans, V.: „Phase estimation of complex modulated ultrasonic signals influenced by streaming fluid using extended Kalman filter“, SCI 2002, Proceedings Volume III, S. 331-334, Orlando, USA.
- [12] Gatzmanga, H., Breier, A.: „Untersuchungen zur Parameterabhängigkeit des Durchfluß-Frequenzverhaltens bei Vortex-Zählern“, TM 61, S. 359-364, 1994.
- [13] Gersten, K., Herwig, H.: „Strömungsmechanik“, Vieweg 1992.
- [14] Hans, V.: „Systemtheorie“, Vorlesungsskript, Universität Essen, WS 2001/02.
- [15] Haykin, S.: „Adaptive Filter Theory“, 3rd Edition, Practice Hall Information and System Sciences Series, 1996.
- [16] Hans, V., Poppen, G., Rettich, T., Perpéet, S.: „Fluid flow diagnostics with ultrasound waves“, Conference on Fluid Dynamic Measurements and its applications, Proceedings, 341-344, Beijing 1997.
- [17] Hans, V., Poppen, G., Rettich, T., Perpéet, S.: „Vortex shedding flowmeters and ultrasound detection: Signal processing and bluff body geometry“, Flow Measurement and Instrumentation, 9, 79-82, 1998.
- [18] Jonas, B.: „Entwicklung und Untersuchung von digitalen und analogen Demodulationsschaltungen für komplex modulierte Ultraschallsignale“, Diplomarbeit, Universität Essen, 2001.

8 Literaturverzeichnis

- [19] Kak, A, Slaney, M.: „Principles of computerized tomographic imaging“, IEEE Press, 1988.
- [20] Kohlrausch, F.: „Praktische Physik 1“, 24.Auflage, Teubner Verlag, 1996.
- [21] Kostrzewa, M.: „Einflüsse und Vergleich pulsierender Strömungen auf Ultraschalldurchflussmessungen mittels Korrelation und Wirbelfrequenz“, Diplomarbeit, Universität Essen, 2002.
- [22] Loffeld, O.: „Estimationstheorie II, Anwendungen Kalman-Filter“, Oldenbourg Verlag, 1990.
- [23] Mäusl, R.: „Analoge Modulationsverfahren“, Hüthig Verlag, 1988.
- [24] <http://www.marco.de/D/ps/mt/5/001.html>.
- [25] <http://www.massa.com/datasheets/e188.html>.
- [26] Niemann, M.: „Signalverarbeitung in der Ultraschall-Durchflussmessung“, Dissertation, Universität Essen, 2002.
- [27] Nougier, J., P.: „Méthodes de calcul numérique“, Masson 1983.
- [28] Perpéet, S.: „Numerische Simulation von Strömungsfeldern um Durchfluss-Messanordnungen“, Dissertation, Universität Essen 2000.
- [29] Peters, M.C.A.M., van Bokhorst, E., Limpens, C.H.L.: „Impact of pulsations on vortex flowmeters“, Proceedings Flomeko 1998, S. 185-190, Lund Schweden, 1998.
- [30] Poppen, G.: „Durchflussmessung auf der Basis kreuzkorrelierter Ultraschallsignale“, Dissertation, Universität Essen, Shaker 1997.

- [31] Radon, J.: „Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeit“, Königlich sächsische Akademie der Wissenschaften / Mathematisch physikalische Klasse, 69: 262-277, 1917.
- [32] Schneider, F.: „Eine Analyse der Entstehung der Messsignale bei der korrelativen Ultraschall-Durchflussmessung in turbulenter Strömung“, Dissertation, Universität Essen, Shaker 2001.
- [33] Schönbach, B.: „Schallausbreitung in gekoppelten Rohrsystemen“, Dissertation, Universität Frankfurt, VDI-Reihe 7 Nr. 176, 1990.
- [34] Shu, Weiqun.: „Durchflussmessung in Rohren mit Hilfe von künstlichen und natürlichen Markierungen“, Dissertation, TH Karlsruhe, 1987.
- [35] Sielschott, H.: „Tomographie mit wenigen Daten: Anwendung von Kollokationsverfahren in der Schallpyrometrie“, Abschlussbericht, RWE Energie 1994.
- [36] Skwarek, V.: „Verarbeitung modulierter Ultraschallsignale in Ein- und Mehrpfadanordnungen bei der korrelativen Durchflußmessung“, Dissertation, Universität Essen, Shaker 2000.
- [37] Windorfer, H.: „Optimierung von Wirbelfrequenzmessgeräten mit demodulierten Ultraschallsignalen“, Dissertation, Universität Essen, Shaker 2001.
- [38] Worch, A.: „Korrelative Ultraschalldurchflussmessung von ein- und zweiphasigen Strömungen mit Clamp-on Sensoren“, Dissertation, Universität Karlsruhe, VDI-Verlag 2000.
- [39] Baker, R.C.: „Flow Measurement Handbook“, Cambridge University Press, 2000